

# Jyväskylän joukkoliikenteen runkolinjojen sähköistäminen

Olli Ujanen

Pro gradu -tutkielma

Maantieteen tutkimusyksikkö

Oulun yliopisto

22.6.2020



Yksikkö:	Pääaine:		
Maantieteen tutkimusyksikkö	Maantiede		
Tekijä	Opiskelija-numero:	2370990	Tutkielman sivumäärä: 64 + 19 liit.
Ujanen Olli Jaakko Aleks			
Tutkielman nimi			
Jyväskylän joukkoliikenteen runkolinjojen sähköistäminen			
Asiasanat: GIS, joukkoliikenne, sähköbussi, pikalataus			
Tiivistelmä			
<p>Ilmastonmuutoksen vastaisen taistelun myötä liikenteestä johtuviin päästöihin haetaan jatkuvasti uusia ratkaisuja. Yksi kehityskohde on julkisten hankintojen ohjaaminen kohti vähäpäästöisempiä vaihtoehtoja. Julkisen liikenteen osalta tämä tarkoittaa tulevaisuudessa sähköbussien käyttöönottoa vähintään osalla nykyisistä bussilinjoista. Sähköbussien liikennöinnin järjestäminen voi kuitenkin erota merkittävästi nykyisistä polttomoottorikäyttöisistä busseista ja linjojen sähköistämisen avuksi tarvitaan tutkittua tietoa. Tämän tutkielman tarkoitus on tuottaa Jyväskylän kaupungille tietoa sähköistämisen tueksi erityisesti keskeisille sijainneille sijoitettavien pikalatauslaitteiden varaan perustuvan bussiliikenteen näkökulmasta. Tutkielmassa etsitään pikalataukselle sopivia sijoituspaikkoja ja määritetään niiden pohjalta tarvittavat bussien ja laitteiston ominaisuudet.</p> <p>Aineistona tutkielmassa käytettiin kahta Jyväskylän kaupungin toimittamaa runkolinjaehdotusta sekä nykyisten linjojen ominaisuustietoja. Runkolinjojen kartoitusprosessi oli tutkielman luovutushetkellä edelleen käynnissä, eivätkä käytetyt runkolinja-aineistot välttämättä vastaa lopullista runkolinjasuunnitelmaa. Tieverkkona tutkielmassa käytettiin Väylän koostamaa Digiroad-aineistoa.</p> <p>Sopivia latausasemasijainteja etsittiin aineistosta ArcMap -ohjelmiston Network Analyst -lisäosaan kuuluvan Location Allocation -analyysin avulla. Analyysillä haettiin verkoston keskeisiä sijainteja, joihin sijoitettaville latausasemille saatiin korkea käyttöaste. Keskeiset sijoituspaikat myös mahdollistavat linjaston joustavan jatkokehittämisen ja uusien linjojen sähköistämisen. Saatujen sijaintien pohjalta rakennettua bussiverkostoa testattiin Python -ohjelmointikielellä toteutetulla simulaatiolla, jossa bussit liikennöivät linjoja pitkin ladaten valituilla pysäkeillä. Simulaatiolla tutkittiin akuston, latauslaitteiston ja latausajan mitoitusta. Simulaatiossa kuvattiin myös verkon toimintaa poikkeustilanteissa, joissa jonkin latauslaitteen käyttö estyi.</p> <p>Tutkielman tuloksena sijoitettiin kahdeksan latauspistettä, jotka syöttivät joko useita linjoja tai sijaitsivat pisteissä, jotka ovat nykyisten bussilinjojen kannalta keskeisiä. Laitteistomitoituksen osalta löydettiin useita toimivia vaihtoehtoja, jotka simulaation perusteella mahdollistivat toiminnan jatkumisen myös poikkeustilanteissa. Tutkimuksen perusteella tarkka linja- ja pysäkkikohtainen optimointi on mahdollista. Kokonaisuutena pikalatausasemien sijoittaminen keskeisille sijainneilla on yhteiskäytön kautta tehokas ja joustava sähköistämistapa, mutta pitkälle viety optimointi voi tehdä erityisesti linjasuunnittelusta haasteellista.</p>			
Muita tietoja:	Tutkielma tehtiin tilaustyönä Jyväskylän kaupungille		
Päiväys:	22.06.2020		

## Sisällysluettelo

1. Johdanto.....	4
1.1 Tutkimuksen tausta.....	4
1.2 Tutkimuksen rakenne.....	5
1.3 Sähköbussin määritelmä .....	6
1.3.1 Pikalataus .....	6
1.3.2 Varikkolataus.....	7
1.3.3 Sähköbussin energiankulutus.....	8
1.3.4 Sähköbussin kustannukset .....	10
2. Kirjallisuuskatsaus .....	12
2.1 Sähköajoneuvoihin liittyvää tutkimusta lyhyesti .....	12
2.2 Bussiverkoston sähköistämisen suunnittelu .....	13
3. Tutkimusaineisto .....	18
3.1 Reitti- ja nousija-aineisto .....	18
3.2 Tieaineisto .....	22
4. Menetelmä .....	22
4.1 Graafiteoria .....	23
4.2 Lokaatio-allokaatio analyysin perusteet .....	24
4.3 Analyysin käytännön toteutus .....	26
4.4 Olioperusteisuus mallinnuksessa ja ohjelmoinnissa .....	30
4.5 Simulaation käytännön toteutus.....	32
5. Tulokset.....	34
5.1 Lokaatio-allokaatio.....	34
5.1.1 Skenaario 1 – Päätepysäkkilataus .....	34
5.1.2 Skenaario 2 – Tehokas latausasemien sijoittelu .....	36
5.1.3 Skenaario 3 – Parannellut latausasemien sijainnit .....	37
5.1.4 Lopulliset latausasema sijainnit .....	39
5.2 Linja ja sijoituspaikkakohtainen tarkastelu .....	40
5.2.1 Linja 1 .....	43
5.2.2 Linja 2 .....	43
5.2.3 Linja 3 .....	44
5.2.4 Linja S1 .....	45
5.2.5 Linja 12 .....	45

5.2.6 Sijoituspaikkakohtainen tarkastelu .....	45
5.3 Bussiverkoston simulointi .....	51
6. Tulosten tarkastelu .....	55
7. Pohdinta .....	57
LÄHTEET .....	59
LIITTEET .....	64

# 1. Johdanto

## 1.1 Tutkimuksen tausta

Ilmastomuutoksen pysäyttäminen on yksi Euroopan unionin, ja sen jäsenmaiden, keskeisistä tavoitteista. Tähän tavoitteeseen on sitouduttu kansainvälisellä tasolla allekirjoittamalla Pariisin ilmasopimus 2015, jonka lisäksi päästöjen vähentämiseksi on tehty useita kansallisen sekä paikallisen tason suunnitelmia. Suomessa tavoitteeksi on asetettu hiilineutraalius vuoteen 2045 mennessä. Vastaavasti paikallisen tason toimijana Jyväskylän kaupunki on sitoutunut strategiassaan (B: Jyväskylän kaupunki 2019) ja kunta-alan energiatehokkuus -sopimuksessa kasvihuonepäästöjen leikkaamiseen energiankulutusta vähentämällä ja edesauttamalla uusiutuvien energioiden käyttöönottoa (Työ- ja elinkeinoministeriö ym. 2016). Tavoitteisiin pääseminen vaatii toimia usealla eri osa-alueella, joista liikenne on yksi keskeisimmistä. Pelkästään tieliikenteestä aiheutuvien päästöjen osalta Euroopan unionin tavoitteena on nollataso vuoteen 2050 mennessä. Tähän tavoitteeseen pyritään edesauttamalla ja ohjaamalla yksityisiä sekä julkisia ajoneuvohankintoja kohti puhtaampia energiamuotoja, kuten biopolttoaineita ja sähköä (EUVL 2019; Liikenne- ja viestintäministeriö 2018). Yksityisellä sektorilla sähköautojen markkinaosuus onkin noussut viime vuosina räjähdysmäisesti (Bannon 2020). Julkisella puolella vastaavaa kasvua liikenteen sähköistämisen osalta ei olla vielä nähty, mutta joukkoliikenteen sähköistämisen on selkeästi yksi Euroopan unionin tavoitteista.

Direktiivissä puhtaiden ja energiatehokkaiden tieliikenteen moottoriajoneuvojen edistämiseksi asetetaan julkisen puolen toimijoille tähtäimeksi kasvattaa puhtaiden, eli bio- tai sähkökäyttöisten, ajoneuvojen määrää hankinnoissaan. Joukkoliikenteen osalta tämä tarkoittaa, että jo vuoden 2030 loppuun mennessä kaikista M3-ajoneuvoluokan mukaisista linja-autojen hankinnoista 59 prosenttia pitäisi olla puhtaita. Näistä 59 prosentista puolet tulisi olla sähköbusseja ja puolet biopolttoainebusseja (EUVL 2019). Suomessa liikenne- ja viestintäministeriö on linjannut, että linja-autojen käyttövoimajakautuksen uusmyynnistä vähäpäästöisiä tulisi olla 30 prosenttia vuonna 2025 ja jo 55 prosenttia vuonna 2030 (Liikenne- ja viestintäministeriö 2018). Asetetut tavoitteet ovat kovia ottaen huomioon, että Euroopan alueella vuonna 2019 polttomoottoribusseja oli 725 000 ja sähköbusseja vain noin 2500 (Niestadt & Børnåvold 2019). Vastaavasti Suomessa vuoden 2020 alussa liikennöi 64 sähköbussia ja noin 8700 polttomoottoribussia (Trafi 2020). Sähköistämisen edistämiseksi on esitetty

tukitoimia Euroopan unionin ja Suomen valtion suunnilta (EUVL 2019; Liikenne- ja viestintäministeriö 2018).

Paikallisella tasolla Jyväskylän kaupunki on pyrkinyt edistämään direktiivin (EUVL 2019) mukaisesti vähäpäästöisen kaluston käyttöä joukkoliikenteessä (A: Jyväskylän kaupunki 2019; C: Jyväskylän kaupunki 2019) ottamalla käyttöön ensimmäiset kaasubussinsa vuonna 2018 (Muurinen 2019). Sähköbussien osalta selvitys- ja suunnittelutyö on käynnissä, ja tämä tutkielma on yksi osa selvitystyötä. Kaasubussien käyttöönottoon verrattuna sähköistäminen tuo mukanaan useita muutoksia joukkoliikenteen toimintaan. Esimerkiksi sähköbussien ominaisuudet, niiden tarvitsema infrastruktuuri ja linjasuunnittelu poikkeavat merkittävästi polttomoottorikäyttöisistä busseista (Lehtinen & Kanerva 2017; A: Sclar 2019). Tutkielman tarkoitus on löytää vastauksia sähköistämiseen liittyviin kysymyksiin ja tarjota Jyväskylän joukkoliikennesuunnittelijoille tutkittua tietoa sähköistämisen tueksi kahden tutkimuskysymyksen kautta:

- 1) Missä runkolinjojen alueella sähköbussien pikalataukselle on parhaiten sopivat sijainnit?
- 2) Millaisia sijainteihin rakennettavan laitteiston ja linjalla liikennöivän kaluston ominaisuuksien tulee olla järjestelmän toiminnan turvaamiseksi?

Tutkielma tehtiin tilaustyönä Jyväskylän kaupungille. Kaupungin puolelta pääasiallisena vastuuhenkilönä ja tutkielman ohjaajana toimi joukkoliikennepäällikkö Ari Tuovinen ja Oulun yliopiston puolesta ohjauksesta vastasi Harri Antikainen.

## 1.2 Tutkimuksen rakenne

Tutkielman aloittavassa johdannossa esitellään tutkielman tausta sekä määritellään sähköbussi ja sen ominaisuudet. Johdannon jälkeisen kirjallisuuskatsauksen alussa esitellään lyhyesti sähköajoneuvoihin liittyvää tutkimusta, jonka jälkeen käydään tarkemmin läpi sähköbussiverkoston suunnitteluun liittyviä tutkimuksia. Sähköbusseihin liittyvän kirjallisuuskatsauksen jälkeen esitellään tutkimusaineisto ja tutkimuksessa käytettävä menetelmäteoria. Menetelmäteorian yhteydessä esitellään myös analyysissa ja simulaatiossa käytetyt ominaisuus- ja raja-arvot sekä käytännön toteutus.

Menetelmän ja aineiston pohjalta saadut tulokset esitellään kolmessa osassa, joista kahdessa ensimmäisessä tarkastellaan paikkatietoanalyysin tuloksia ja kolmannessa analyysin pohjalta tehdyn simulaation tuloksia. Paikkatietoanalyysissä haetaan teoriaan pohjalta hyviä latausaseman sijoituskohteita kolmen skenaarion kautta. Ensimmäisessä korostuu aikataulutuksen sekä maankäytön kannalta helpot sijoituspaikat, toisessa skenaariossa etsitään yhteiskäytön kannalta tehokkaita sijoituspaikkoja ja kolmannessa skenaariossa haetaan edellisiin skenaarioihin perustuvaa yhdistelmäratkaisua. Analyysin jälkeen simulaatiolla tutkitaan löydettyjen kohteiden pohjalta luodun bussiverkoston toimintaa ja tuotetaan tarkempaa tietoa sen toiminnasta eri tilanteissa. Simulaatiolla tarkastetaan analyysissä löydettyjen sijaintien toimivuus bussijärjestelmän pohjana. Kahdessa viimeisessä kappaleessa tarkastellaan ja tulkitaan saatuja tuloksia kootusti, sekä pohditaan millaisia virhelähteitä ja jatkokehitysmahdollisuuksia tutkimuksessa on.

### 1.3 Sähköbussin määritelmä

Täyssähköbusseissa ainoana voimanlähteenä toimii sähkömoottori, jonka käyttämä sähköenergia varastoidaan busseihin sijoitettaviin akustoihin. Akulliset täyssähköbussit voidaan jakaa karkeasti lataustavan perusteella pysäkki-/pikaladattaviin ja varikkoladattaviin. Molempia lataustapoja käytetään yleensä samanaikaisesti, sillä esimerkiksi puhtaasti pikalataukseen perustuvaa bussiverkostoa on hankalaa toteuttaa ilman varikolle sijoitettavaa ylläpitolataukseen tarkoitettua latauslaitteistoa. Seuraavassa käydään tarkemmin läpi lataustapojen erot.

#### 1.3.1 Pikalataus

Pikalatauksessa akustoja ladataan pääasiassa normaalin liikennöinnin aikana. Latauspisteitä voidaan sijoittaa linjan varrella oleville bussipysäkeillä tai reittien päätyihin. Pikalatauksen ovat mahdollistaneet akku- ja latausteknologian nopea kehitys ja nykyisin markkinoilla on saatavilla jo 700kW lataustehoon kykeneviä pikalatauslaitteistoja (ZeEUS eBus Report #2 2018; ABB 2020; Siemens 2020). Kasvaneet lataustehot mahdollistavat bussien lataamisen nopeasti, jolloin bussien on mahdollista liikennöidä aikataulun puitteissa vuorokauden ympäri ilman tarvetta korvaaville busseille (Kunith ym. 2016). Pysäkkilatauksessa latauslaite on tyypillisesti

virroitinlaturi, mutta lataus voidaan toteuttaa myös induktiolaturilla. Virroitinlataus vaatii fyysisen kontaktin, joka tarkoittaa yleensä bussin yhdistämistä bussin yläpuolella sijaitsevaan latauslaitteeseen. Vastaavasti induktiolataus toimii langattomasti ja latauslaite voidaan sijoittaa esimerkiksi bussin alle katuun, jolloin lataustapahtuma käynnistyy bussin ajaessa latauspisteen päälle. Suomessa toimivilla sähköbussilinjoilla käytetään tällä hetkellä vain virroitinlatausta (Lehtinen & Kanerva 2017). Induktiolatauksen yleistymisen esteenä ovat kallis toteutushinta ja toimintavarmuuteen liittyvät ongelmat. Induktiolatauksen tehokkuus voi kärsiä esimerkiksi tiellä olevien lehtien tai lumen takia (Laurikko ym. 2015).

Pysäkki-/pikalatauksen vahvuuksia ovat mahdollisuus akustojen ja laitteiston kokojen minimointiin (Vilppo 2014). Akustojen koko on yksi keskeinen sähköbussikaluston hintaa, painoa ja bussin energiankulutus määrittävistä tekijöistä. Lisäksi akustokoon kasvattaminen vaikuttaa myös negatiivisesti kuljetuskapasiteettiin (Lehtinen & Kanerva 2017). Pienten akustojen haaste on, että pysäkkilatausta käyttävät bussit eivät välttämättä pysty täydelläkään varauksella operoimaan kuin muutamia kymmeniä kilometrejä kerrallaan (FCH-JU 2012). Euroopassa pikalatausta hyödyntävien bussien akustokapasiteetit vaihtelevat 2kWh akustoista yli 100kWh akustoihin. Pienimmät akustot ovat käytössä lyhyen linjapituuden lentokenttäbusseissa ja isoimpia akustoja käyttävät bussit lataavat vain muutaman kerran päivässä yleensä reitistön ulkopuolelle sijoitetuissa lataustermiinaaleissa (ZeEUS eBus Report #2 2018). Suomessa kaupunkiseuduilla on käytössä 55–75 kWh akustokapasiteeteilla varustettuja pikaladattavia sähköbusseja, jotka mahdollistavat noin 30–60 kilometrin operaatiosäteen (Lehtinen & Kanerva 2017). Tämän hetken teknologialla pikalatausta pidetään varsinkin suuren kalustomäärän ja liikennesuoritteiden omaavilla reiteillä kilpailukykyisenä vaihtoehtona perinteisille dieselbusseille (Lehtinen ym. 2018; Pihlatie ym. 2019).

### 1.3.2 Varikkolataus

Varikkolatauksessa ajatus on, että bussit liikennöivät koko liikennöintiajan ilman välilatauksia ja akuston lataus suoritetaan liikennöinnin loputtua bussin siirtyessä varikolle. Riittävän operointisäteen saavuttamiseksi akkukapasiteetin on siten oltava huomattavan suuri. Euroopassa puhtaasti varikkolatausta hyödyntävien bussien akustokapasiteetit vaihtelevat aina 120 kWh ja 400 kWh välillä riippuen päivittäisestä liikennöintisuoritteesta (ZeEUS eBus Report #2 2018). Tampereella tehdyssä tutkimuksessa 20 kilometrin linjalla varikkolatausta



hyödyntävän bussin arvioitiin tarvitsevan noin 400 kWh akun (Vilppo & Markkula 2015). Laajemmassa bussiliikenteen toimijoille tehdyssä kyselyssä varikkolataukseen perustuvien bussien arviointiin tarvitsen noin 300 kWh akuston (Lehtinen ym. 2018). Varikkolatausta hyödyntävä bussiverkko on pysäkkilatausta yksinkertaisempi toteuttaa, koska uutta infrastruktuuria ei tarvitse rakentaa kuin varikoille. Varikkolataus on myös joustava vaihtoehto, sillä linjojen määritysten ei tarvitse perustua linjojen varsilla oleviin latauspisteisiin (FCH-JU 2012). Puhtaasti varikkolataukseen perustuva toteutustapa ei kuitenkaan sovellu suuren liikennesuorituksen linjoille pysäkkilatauksen tavoin. Arvioilta 65kg akustoa tarkoittaa kuljetuskapasiteetin vähentymistä yhdellä hengellä (Mäkinen & Nap 2019). 65kg akkua tarkoittaa LTO-teknologialla noin 5kWh kapasiteettia, kun energiatiheudeksi oletetaan 80Wh/kg (Erkkilä ym. 2019). Puhtaasti varikkolataukseen perustuvien bussien kuljetuskapasiteetti voi siten olla useita kymmeniä paikkoja pienempi kuin pikalatausta hyödyntävän bussin (ZeEUS eBus Report #2 2018).

*Taulukko 1. Sähköbussien ja latauslaitteiston ominaisuuksia kootusti.*

Lataustyyppi	Suomessa käytössä olevien latauslaitteiden teho	Teknologian mahdollistama teho	Akustojen koko (EU)	Akustojen koko (Suomi)
Pikalataus	300kW	Jopa 700kW	2-100kWh	55-75kWh
Varikkolataus	20-50kW	-	120-400kWh	300kWh

### 1.3.3 Sähköbussin energiankulutus

Perinteisiin polttomoottoribusseihin verrattuna sähköbussien suurin vahvuus on niiden parempi energiatehokkuus (Mahmoud ym. 2016), joka on seurausta sähkömoottoreiden hyvästä hyötysuhteesta. Sähkömoottorille tyypillistä on suuri vääntö laajalla kierrosalueella aina nollasta kierroksesta lähtien. Energiatehokkuus korostuu eritoten hitaassa ajossa, jolloin keskinopeus pysyy pienenä ja pysähdyksiä sekä liikkeelle lähtöjä on paljon (Ercan ym. 2015; Vilppo & Markkula 2015). Sähkömoottori ei kuluta juurikaan energiaa bussin ollessaan pysähdyksissä ja jarrutettaessa on mahdollista kerätä liike-energiaa talteen varastoimalla sitä takaisin akustoihin (Kuhne 2010; Vilppo & Markkula 2015; Zhou ym. 2016). Sähkömoottorin ominaisuuksien puolesta sähköbussi soveltuu erinomaisesti hitaanajon kaupunkiympäristöön.

Sähköbussien energiankulutukseen vaikuttavia tekijöitä ovat bussin paino, keskinopeus, pysähdyksien määrä, pinnanmuodot, vuodenaika, ilmasto ja vallitseva lämpötila (Lehtinen ym. 2018; Lehtinen & Kanerva 2017; Kunith ym. 2016). Ulkoisista tekijöistä vuodenaikan, ilmaston ja lämpötilan vaikutus energiankulutuksen korostuu Suomen olosuhteissa (Lehtinen & Kanerva 2017). Lisälaitteiden, kuten sisätilanlämmittimen tai ilmastoinnin on tutkittu lisäävän bussin energiankulutusta merkittävästi (Lehtinen ym. 2018; Kunith ym. 2017; Kunith ym. 2016; Zhou ym. 2016; Rogge ym. 2015). Lämmityksen toteuttaminen sähkötoimisilla lämmitysvastuksilla on arvioitu lisäävän energian kulutusta kymmenillä prosenteilla ja pahimmillaan voivan jopa tuplata sen (Rogge ym. 2015; Halmeaho ym. 2019; Lajunen & Tammi 2019). Busseihin suositellaan energiatehokkaita HVEC-laitteita, tai polttoainetoimisia lisälämmittimiä (Vilppo & Markkula 2015; Kunith ym. 2017). Lisälämmittimiä tarvitaan etenkin Suomen kaltaisissa olosuhteissa, joissa pelkkä HVEC-laite ei ole riittävä ratkaisu (Kanerva ym. 2018; Kanerva & Lehtinen 2017), sillä sen tehokkuus tippuu lämpötilan laskiessa alle 15 pakkasasteen. Matkustusmukavuuden ylläpitämisen lisäksi lämpötilan vaihteluilla on vaikutusta myös akustojen toimintaan. Akustojen optimaalinen käyttölämpötila on noin 25 astetta, joka olisi saavutettava ympäröivästä lämpötilasta riippumatta (Vilppo & Markkula 2015). Käyttölämpötila on kuitenkin riippuvainen käytetystä akkuteknologiasta.

Tutkimuksessa päädyttiin käyttämään Suomessa saatuja tuloksia energiankulutuksesta muun muassa ilmaston vaikutuksen takia. Sähköbussien energiakulutuksissa vaikuttaisi tutkimusten perusteella olevan suuria eroja, joita esimerkiksi Ranta ym. (2018) tutkimuksessaan selitti bussien vaihtelevilla (15–35%) kyvyillä regeneroida jarrutuksissa sähköenergiaa takaisin akustoihin. Samanlaisia tuloksia regeneroivan jarrutuksen merkitys on saatu myös muissa tutkimuksissa (ks. Kunith ym. 2014; Rogge ym. 2015). Suomessa saatuja ja tutkimuksessa käytettyjä energiankulutuslukemia on kerätty seuraavalle sivulla taulukkoon 2.

Taulukko 2. Suomessa saatuja tai käytettyjä sähköbussin kulutuslukemia

Bussin energian kulutus (kWh/km)	Kulutuslukeman alkuperä	Lähde	Lisätieto
1,05–1,6	Mittaus ja simulointi	Halmeaho ym. (2019)	Lämmitys ja ilmastointi huomioitu Kulutuskeskiarvo Braunschweig kierrolla 1,15kWh/km
1,02	Mittaus	Ranta ym. (2018)	Lämmitystä tai ilmastointia ei huomioitu tutkimuksessa
1–1,5	Simulointi	Lajunen & Tammi (2019)	Ilmaston vaikutus kulutukseen noin 10% Oulun ja Helsingin välillä
1,05–1,24	Simulointi	Pihlatie ym. (2014)	Lämmitys ja ilmastointi huomioitu
1,00	Mittaus	D: Jyväskylän kaupunki (2019)	Lukema peräisin Espoosta useamman vuoden sähköbussiliikennöinnin tuloksena
1,0–1,07	Käytetty tutkimuksessa	Vilppo & Markkula (2019)	Tutkimuksessa käytettiin kulutuslukemia välillä 1,0– 1,07kWh/km bussin tyyppin mukaan

#### 1.3.4 Sähköbussin kustannukset

Yksi suurimmista sähköbussien käyttöönottoa hidastavista tekijöistä ovat alun korkeat hankintakustannukset, jotka vaikuttavat negatiivisesti kaupunkien ja liikennöitsijöiden halukkuuteen ja mahdollisuuksiin ottaa käyttöön uutta teknologiaa (Lajunen 2014; Mahmoud ym. 2016; A: Sclar ym. 2019). Palveluntarjoajat eivät ota käyttöön uutta teknologiaa yksin sen perusteella, että se olisi päästöttömämpää verrattuna nykyiseen, vaan uuden teknologian on oltava myös kustannuksiltaan kilpailukykyistä (Zhou ym. 2016). Sähköbussin ja polttomoottorikäyttöisten bussien kokonaiskustannusten suora vertailua on monimutkaista, sillä kokonaiskustannuksissa painottuvat eri tekijät. Sähköistämisen myötä kustannusrakenne siirtyy käytöstä huomattavasti hankintapainotteisemmaksi.

Hankintakustannuksiltaan sähköbussit ovat perinteisiä busseja kalliimpia ja lisäksi ne vaativat uuden latausinfrastruktuurin rakentamista. Puhtaasti varikkolatausta hyödyntävien bussien osalta infrastruktuurin rakentamiskustannuksen jäävät pysäkkilatausta alhaisemmiksi. Yhden 200kW pikalatausaseman on arvioitu kustantavan noin 200 000€ pois lukien rakentamisesta johtuvat kustannukset, jotka riippuvat pitkälti latausaseman sijainnista (Vilppo 2015). Kustannukset kasvavat mitä kauempaa latausasemille joudutaan vetämään kaapelointi.

Esimerkiksi 20kV kaapelin hinnaksi on arvioitu 35 000–40 000€ kilometriltä (Mäkinen & Nap 2019).

Bussien kustannuksista noin kolmasosa on peräisin akuista, joten akustokapasiteetteja optimoimalla on mahdollista vähentää hankintakustannuksia huomattavasti (Kunith ym. 2017). On esitetty arvioita, että esimerkiksi LTO-akkuteknologia maksaisi 2020-luvulla noin 500 €/kWh (Lehtinen & Kanerva 2017). Akuista ja infrastruktuurista koituvat suuret investointikustannukset korostuvat erityisesti siirtymävaiheessa, jolloin ensimmäisiä linjoja ruvetaan sähköistämään. Pitkällä aikavälillä kokonaiskustannuksia tarkasteltaessa perinteisten ja sähköbussien kokonaiskustannuksen lähenevät toisiaan (Vilppo 2015; Zhoy ym. 2016; Lehtinen & Kanerva 2017; B: Xylia ym. 2017; Halmeaho & Laurikko 2019). Sähköbussien pienemmät käyttökustannukset, jotka voivat olla vain viidennes polttomoottorikäyttöisten bussien käyttökustannuksista, pienentävät sähköbussien kokonaiskustannukset (Mahmoud ym. 2016: 678). Pienempien käyttökustannuksia takia erityisesti pysäkilataukseen perustuvat linjat muuttuivat suurilla ajomäärillä (yli 80 000km/vuosi) entistä edullisimmiksi perinteisiin busseihin verrattuna (Lehtinen ym. 2017).

Pienemmät käyttökustannukset johtuvat pääasiassa sähköbussien pienemmistä polttoainekuluista, mutta myös sähköbussien ylläpitokustannusten on arvioitu olevan dieselbusseja halvempaa johtuen sähkömoottoreiden yksinkertaisuudesta polttomoottoreihin verrattuna (Vilppo 2015; Lehtinen ym. 2018). Sähköbussien ylläpitokustannuksista suurin yksittäinen menoerä syntyy akustojen uusimisesta. Akustojen keskimääräinen käyttöiän, johon vaikuttavat muun muassa akustojen tyyppi, kuormitus, latausrajoitteet ja lataussyklien määrä, on arvioitu olevan viidestä kahdeksaan vuotta (Franca ym. 2017; Lehtinen ym. 2018; Erkkilä ym. 2019). Huolto- ja ylläpitokustannuksia kertyy kaluston lisäksi myös latauslaitteiden ylläpidosta. Latausinfrastruktuurin runkorakenteet ovat pitkäikäisiä, mutta niihin sijoitettavan latausjärjestelmän käyttöikä on noin 10 vuotta (Lehtinen ym. 2018).

Tutkimusten perusteella erityisesti pikalataukseen perustuvien sähköbussien kokonaiskustannuksiin on mahdollista vaikuttaa tehokkaalla suunnittelulla (Olsson ym. 2016; Pihlatie ym. 2019). Latausasemien sijaintioptimointi akkukapasiteettien minimoiseksi (Kunith ym. 2017) ja korkea latausasemien käyttöaste siten, että yksittäistä latausasemaa käytettäisiin mahdollisimman monen kulkuneuvon toimesta (Laurikko ym. 2015; Vilppo 2015; Pihlatie ym. 2019; Lajunen 2019), laskevat molemmat hankinta- ja ylläpitokustannuksia ja siten myös kokonaiskustannuksia. Kaluston ja infrastruktuurin lisäksi myös muita bussijärjestelmän

toimivuuteen vaikuttavia tekijöitä, kuten aikataulua, reititystä ja kuljettaja vuoroja muokkaamalla on kokonaiskustannuksia mahdollista pienentää (Olsson ym. 2016). Pihlatie ym. (2014) mukaan bussiverkoston kokonaistarkastelu on avainasemassa, kun tavoitellaan kilpailukykyisiä sähköistämisen kokonaiskustannukset perinteisiin markkinoilla oleviin vaihtoehtoihin verrattuna.

Jo nykyisin sähköbussien kokonaiskustannuksia pidetään yleisesti kilpailukykyisinä ja teknologian tulevaisuuden näkymät ovat hyvät. Tällä hetkellä suurimpia esteitä sähköbussien laajemmalle käyttöönotolle ovat standardoinnin puuttuminen (A: Sclar ym. 2019), alhaiset tuotantomäärät ja epävarmat sekä osaksi puuttuvat jälkimarkkinat (Lehtinen ym. 2018). Nykyisin käytössä oleva teknologia on vielä prototyyppivaiheessa (Laurikko ym. 2015; Mahmoud ym. 2016), mutta tulevaisuudessa hintojen odotetaan edelleen laskevan tuotantotekniikan ja teknologian edelleen kehittyessä (Lajunen 2014).

## 2. Kirjallisuuskatsaus

### 2.1 Sähköajoneuvoihin liittyvää tutkimusta lyhyesti

Käydään seuraavaksi tiivistetysti läpi aikaisempaa aihealueeseen liittyvää tutkimusta. Laajemmasta näkökulmasta latauspisteiden sijoitteluongelmaa ovat tutkineet muun muassa Riemann ym. (2015) ja Cruz-Zambrano ym. (2013), jotka molemmat pyrkivät soveltamaan ryhmiseen alun perin Hodgson (1990) kehittämää FCLM mallia (flow capturing location model). FCLM malli mahdollistaa liikenteen muodostaman kysynnän kuvaamisen realistisina virtoina. Riemannin mallissa pyrittiin sijoittamaan määrätty määrä langattomia latauspisteitä sijainteihin, joissa liikennevirrat synnyttävät lataukselle voimakkainta kysyntää. Mallissa autot saavat liikkua verkossa vapaasti ja niiden liikkeitä ennustettiin SUE (Stochastic User Equilibrium) mallilla. Cruz-Zambrano ryhmiseen etsi Barcelonasta optimaalisia pikalatauspisteitä vertailemalla perinteisen ja edistyneemmän FCLM mallin eroja. Perinteisessä mallissa huomioitiin ajoneuvojen liike, kun taas edistynyt malli huomioi myös runkoverkon sijainnin ja rakentamisen paikkakohtaiset kulut.

Tarkemmin joukkoliikenteen sähköistämistä koskevissa tutkimuksissa ongelmanasettelu on ollut hyvin laaja-alaista ja aihetta on lähestytty monipuolisesti eri näkökulmista. Rogge ym. (2015) tutki ryhmiseen akusto- ja latauslaitteistokapasiteetteja

Munsterin kaupungissa Saksassa 23 linjasta koostuvalla verkostolla. Tutkimuksessa latauspisteet olivat kiinteitä ja pääpaino oli akustojen ja latauslaitteiden ominaisuuksissa. Rogge ym. (2018) julkaisivat myöhemmin myös tutkimuksen, jossa varikkolataukseen perustuvan bussijärjestelmän mitoittamista lähestyttiin aikatauluongelmana, jossa rajoittavina tekijöinä olivat reitistön ominaisuudet ja latausoperaation kesto. Kunith ym. (2016) sekä Xylia ym. (2017) lähestyivät ongelmaa laajemmasta näkökulmasta selvittäen pikalatauspisteiden ja bussien optimi ominaisuudet, sekä sijainnit koko verkoston osalta. Kunithin menetelmä perustui mixed-integer linear cost-optimization malliin, jota sovellettiin aineistoon, joka käsitti 16 bussilinjaa Berliinin alueella. Xylian aineistona oli koko Tukholman bussiverkosto, joka koostuu 526 linjasta. Tutkimuksessa etsittiin kullekin linjalle soveltuva käyttövoima, joten pikalatausasemia sijoitettiin vain soveltuville linjoille. Xylian tutkimuksessa aineiston käsittelyyn käytettiin ArcMap-ohjelmistoa ja kustannus sekä energia optimointiin GAMS-ohjelmistoa.

Suomessa sähköbusseihin liittyvää tutkimusta on tehty erityisesti VTT:n toimesta. Tutkimuksistaan VTT on julkaissut laajan yhteenvedon *“Electric Commercial Vehicles (ECV): Final report”*, jossa aihetta käsitellään useilla eri tasoilla aina eri akuissa käytettyjen kemiallisten yhdisteiden ominaisuuksiin keskittyvästä tutkimuksesta (Erkkilä ym. 2019) laajempiin bussiverkoston kokonaiskustannuksiin liittyviin tutkimuksiin (Lajunen 2019). Suomessa tehty tutkimus on arvokasta, sillä siinä otetaan pääsääntöisesti hyvin huomioon pohjoisen ilmaston vaikutus sähköbusseihin. VTT on myös kehittänyt oman paikkatietopohjaisen bussiverkon sähköistämisen suunnitteluun tarkoitetun työkalun (Ranta ym. 2016).

## 2.2 Bussiverkostojen sähköistämisen suunnittelu

Tässä kappaleessa käydään läpi erityisesti sähköbussiverkkojen suunnittelun ja sähköbussien käyttöönoton kannalta olennaisia tutkimustuloksia. Suurta kuvaa katsottaessa sähköbussien käyttöönotosta voidaan tunnistaa kaksi merkittävää vaihetta. Näistä ensimmäisessä luodaan pohjaa sähköbussien käyttöönotolle tutkimalla sähköistämiseen vaikuttavia nykyisiä käytäntöjä, lakeja ja asetuksia, tunnistamalla oleelliset sidosryhmät, teknologiat ja rajoitteet, tekemällä kustannus-/kannattavuusselvityksiä ja mahdollisuuksien mukaan myös pilotoimalla sähköbussin käyttöä (B: Sclar ym. 2019). Jyväskylän kaupungin käyttövoimaselvitys 2019 (D: Jyväskylän kaupunki) on hyvä esimerkki tässä vaiheessa tehdystä selvitystyöstä. Suomessa kokoavaa alkuvaiheen selvitystyötä on julkaistu myös liikenneviraston toimesta (Lehtinen & Kanerva 2017;

Lehtinen ym. 2018), joissa saatuja tuloksia ja kokemuksia toimijat voivat hyödyntää omien sähköistämisprosessiensa alkuvaiheessa.

Alkuselvitysten ohella toinen merkittävä vaihe sähköistämisen prosessikokonaisuudessa on sähköbussien varsinainen käyttöönotto. Tässä vaiheessa tehdään konkreettiset ja paikkasidonnaiset suunnitelmat esimerkiksi infrastruktuurin, laitteiston, kouluttamisen, sopimussuhteiden ja bussien loppukäytön osalta (B: Sclar ym. 2019). Tässä vaiheessa kohdesidonnaiset selvitykset ja suunnitelmat ovat tärkeitä tehokkaan ja taloudellisesti kannattavan ratkaisun löytämiseksi (Laurikko ym. 2015; Rogge ym. 2015; Kunith ym. 2017). Tämä tutkimus voidaan mieltää osaksi käyttöönottovaiheen selvitys ja suunnittelu kokonaisuutta, mutta samalla on tiedostettava, että tutkimuksessa saatavat tulokset eivät ole laajuudeltaan riittäviä lopullisten päätösten tekemiseen. Käydään seuraavaksi läpi mitä selvitys- ja suunnittelutyö pitää sisällään.

Selvitys- ja suunnitteluvaiheen sisältä on tunnistettavissa useita pienempiä prosessin sisäisiä vaiheita sekä niihin liittyviä haasteita ja vaatimuksia. Tässä tutkimuksessa on tunnistettu kokonaisuudesta kolme keskeistä vaihetta, jotka ovat tämän tutkimuksen tavoitteiden kannalta erityisen tärkeitä. Näistä ensimmäinen vaihe on selvittää paikalliset tarpeet ja asettaa niiden mukaisesti selkeät tavoitteet, joihin sähköistamisella pyritään vastaamaan (B: Sclar ym. 2019). Toisessa vaiheessa löydettyjen tavoitteiden pohjalta siirrytään kartoittamaan sähköistamiselle soveltuvia reittejä ja kolmannessa vaiheessa kartoitettujen reittien perusteella tehdään tarkempia ajoneuvo- ja laitteistomäärittäyksiä (Markkula & Vilppo 2014). Paikallisten tarpeiden osalta on huomioitava keskeisten perusvaatimusten täyttyminen liikennöitsijän ja palveluntilaajan näkökulmasta. Tarkoitus on varmistaa, että bussiverkon sähköistäminen olisi houkuttelevaa kaikille sidosryhmille. Perusvaatimuksia ovat esimerkiksi tietty kustannustaso sekä luotettavuus ja käytettävyys. Perusvaatimusten olisi pysyttävä vähintään samalla tasolla nykyisten joukkoliikenneratkaisun kanssa. Nykyisen bussiliikenteen palvelutason pitämiseksi on bussiverkon sähköistamiseen liittyvässä suunnittelussa huomioitava nykyisen bussiverkoston ominaisuudet (Lehtinen & Kanerva 2017; Mäkinen & Nap 2019). Seuraavaksi käydään perusvaatimukset läpi aloittaen kustannuksista.

Sähköbussien kulurakenteessa on merkittäviä eroja perinteisiin busseihin verrattuna. Tässä tutkimuksessa käsiteltävät pikalataukseen perustuvat bussilinjat synnyttävät kustannuksia kaluston hankinnan ja huollon, sekä polttomoottoribusseista poiketen myös uuden infrastruktuurin rakentamis- ja huoltokulujen osalta. Dieselbusseihin verrattuna

kustannukset siirtyvät käytöstä hankintapainotteisiksi, mutta kokonaiskustannuksiltaan tehokkaasti suunniteltu sähköistäminen voi kuitenkin olla hyvin lähellä diesel busseja (Xylia ym. 2017), tai jopa niitä halvempi (Zhou ym. 2016). Kustannustehokkuuden ja alhaisten kokonaiskustannusten saavuttamiseksi pysäkkilatausta hyödyntävää bussiverkostoa on tärkeä lähteä suunnittelemaan kokonaisuuden näkökulmasta. Esimerkiksi latausinfrastruktuurin osalta tehokkain ratkaisu on sijoittaa latausasemat bussiverkoston keskeisille sijainneilla, jolloin korkeamman käyttöasteen seurauksena yksittäisen latausaseman hyöty suhteessa kustannuksiin kasvaa (Lehtinen ym. 2018; Pihlatie ym. 2019). Keskeisiä solmukohtia ei kuitenkaan välttämättä havaita, jos sähköistämistä lähdetään suunnittelemaan vain yksittäisten linjojen tai vuorojen osalta. Keskeisten sijaintien käytössä on otettava erityisesti huomioon maankäyttörajoitteet, jotka voivat tehdä latausaseman rakentamisesta ja lataustapahtuman järjestämisestä haasteellista. Latausinfrastruktuurin rakentamisella voidaan muuttaa kaupunkikuvaa ja siksi pikalataukseen perustuvaa bussiverkostoa suunniteltaessa on otettava huomioon myös maankäytölliset näkökulmat (Markkula & Vilppo 2014; Lehtinen & Kanerva 2017; Mäkinen & Nap 2019. Maankäyttökysymysten takia latausasemia sijoitetaan usein linjastojen päätepysäkeille, joissa maankäytölliset rajoitteet ovat usein keskeisiä sijainteja vähäisempiä (Lehtinen ym. 2018).

Tehokkaan sijoittamisen lisäksi kokonaiskustannuksiin voidaan vaikuttaa myös laitteiston määrällä ja mitoituksella. Ne vaikuttavat toisiinsa vastavuoroisesti, joten teoriassa laitteiston tehoa voidaan kompensoida latausasemien määrällä ja määrää laitteiston teholla. Latauslaitteiston määrällä ja teholla on myös merkittävä vaikutus käytettäviin akustoihin ja sitä kautta kaluston kokonaiskustannuksiin (Kunith ym. 2017). Akustokokoja voidaan koittaa minimoida lisäämällä käytettävissä olevien latausasemien määrää tai kasvattamalla lataustehoa (Olsson ym. 2016). Vastavuoroisesti akustojen mitoituksella voidaan vaikuttaa tarvittavan infrastruktuurin määrään ja sen sijainteihin. Kaikkien muuttujien välillä on siis vaikutussuhde, joka tulee huomioida suunnittelussa. Lopullisena pyrkimyksenä on minimoida kaikki yhtälön muuttujat eli latausinfrastruktuurin määrä ja mitoitus sekä akustojen koot. Tällöin kustannuksen pysyvät mahdollisimman pieninä, kun taas ajoneuvon energiatehokkuus sekä matkustajakapasiteetti ovat mahdollisimman suuret (Lehtinen & Kanerva 2017).

Kustannusrakenteen muutoksen lisäksi eri sidosryhmien väliset omistussuhteet, roolit ja vastuut voivat myös pirstaloitua sähköistämisen yhteydessä aikaisempaa enemmän. Tämän seurauksena infrastruktuuri- ja kalustokustannusten kesken on löydettävä kaikkien



osapuolten kannalta kannattava lopputulos (A: Xylia ym. 2017). Pirstaloitumista voi tapahtua esimerkiksi seuraavasti: 1) kaupunki voi rakentaa ja ylläpitää infrastruktuuria ja liikennöivä yritys vastata kaluston hankinnasta ja huollosta, 2) Kaupunki voi vuokrata infrastruktuurin liikennöitsijälle, jolloin rakennuskulut jäävät kaupungille, mutta huoltokuluista vastaisi kulloinenkin liikennöitsijä ja 3) infrastruktuurista vastaisi erillinen operaattori, esimerkiksi paikallinen sähköyhtiö, joka laskuttaisi liikennöitsijää laitteiston käytöstä (Lehtinen & Kanerva 2017; Lehtinen ym. 2018). Bussijärjestelmän suunnittelussa pitäisi pirstaloituminen huomioida, siten ettei yksittäisen sidosryhmän vastuulle jäävää osa-aluetta yli- tai alimitoiteta.

Uuteen teknologiaan siirryttäessä kustannusten lisäksi käytettävyyden ja luotettavuuden aspektit on huomioitava uudella tavalla. Käytettävyydestä puhuttaessa voidaan tarkoittaa esimerkiksi toimintamatkaa, ajo-ominaisuuksia ja käytön helppoutta (Laurikko ym. 2015; Mahmoud ym. 2016). Käytettävyys näkyy eri ryhmille eri tavoin: kuljettava saattaa arvostaa bussin hyvää kiihtyvyyttä ja ohjaustuntumaa, kun taas matkustaja nopeaa, pehmeää ja hiljaista kyytiä. Osaan käytettävyyteen vaikuttavista tekijöistä, kuten kiihtyvyyteen ja ohjaustuntumaan, ei voida suoraan vaikuttaa akuston tai latausinfrastruktuurin optimoinnilla, mutta esimerkiksi toimintamataan ja latausaikoihin voidaan. (Mahmoud ym. 2016). Toimintamatka ja latausaika ovat myös todella tärkeitä muuttujia, koska yksi keskeisimmistä peruseriaatteista on, että matkustajille ei saa koitua haittaa bussiverkon sähköistämisestä bussiliikenteen palvelutason laskun takia (Lehtinen & Kanerva 2017). Pikalatauksessa on tarkoitus suorittaa lataustapahtuma reitin varrella, joko keskeisellä sijainnilla tai päätepysäkillä. Siten erityisesti keskeisillä sijainneilla pitkät latausajat voivat vaikuttaa matka-aikaan ja siten asiakaskokemukseen negatiivisella tavalla.

Lataustapahtuman kannalta nykyiset liikennöintimäärät sekä odotus-/latausajat (dwelling time) on huomioitava tarkasteltaessa latausajan mahdollista vaikutusta matka-aikaan. Odotus- ja latausajat riippuvat pääasiassa pysäkin tyypistä ja nousijamäärästä. Päätepysäkeillä odotusaika on pidempi, koska yleensä siellä suoritetaan aikataulun tasaus. Lisäksi tietyillä pysäkeillä suoritettavia kuljettajan vaihtoja voidaan käyttää latauksen järjestämiseen. Normaaleilla pysäkeillä odotusaikaa voidaan arvioida nousijamäärien perusteella. On tutkittu, että yksi nousu lisää odotusaikaa keskimäärin noin 3,48 sekuntia, jonka lisäksi kokonaisodotusaikaan lisätään 5,14 sekunnin aikasakko, joka kuvaa ovien avautumiseen kuluva aikaa (Dueker ym. 2004). Pysäkeittäin ja linjoittain vaihtelevat odotusajat tarkoittavat, että lyhyt, mutta tiuhaan liikennöity reitti voi olla vaikeampi sähköistää, kuin pidempi, mutta pidempiä

odotusaikoja sisältävä reitti (Rogge ym. 2015). Liian lyhyet pysähdykset eivät tarjoa tarpeeksi aikaa, jotta akkuja kyettäisiin lataamaan riittävästi.

Luotettavuutta voidaan mitata bussin saatavuudella eli sen toimintavarmuudella. Suunnittelussa luotettavuutta voidaan edesauttaa tunnistamalla poikkeustilanteet ja varmistamalla bussiverkon toimivuus näissä tilanteissa. Tyypillinen poikkeustilanne on esimerkiksi latauslaitteen rikkoutuminen, josta seuraa latausvälin pidentyminen ja latausaikojen kasvu muilla toimintakykyisillä pysäkeillä. Latausväliin vaikuttavat latausasemien sijainnit, jotka on järjestettävä siten, että mikä tahansa yksittäinen latauspiste voidaan ohittaa ilman, että akun varaus pääsee liian pieneksi. Riittävä varaus on riippuvainen kyseessä olevasta linjasta, mutta kyselyn mukaan alan toimijat pitävät maksimissaan 50 prosentin varaustason vaihtelua normaalioloissa bussiverkon luotettavuuden kannalta hyvänä rajana (Lehtinen & Kanerva 2017).

Laitteiston rikkoutumisen lisäksi verkoston toiminta voi vaarantua ylikäytön seurauksena. Esimerkiksi latausaseman korkeasta käyttöasteesta voi seurata ei-haluttua päällekkäisyyttä (Vilppo ym. 2015), jolloin useat samanaikaisesti lataukseen pyrkivät ajoneuvot ruuhkauttavat latauspisteen. Tämä on otettava erityisesti huomioon sijoitettaessa latausasemat keskeisille sijainneille, joissa käyttöasteet nousevat pakosta korkeiksi. Suunnittelussa on varmistettava latauspisteen yhteiskäytön hallittavuus. Aikataulun uudistamisella sähköbussien toimintaa suosivaksi voidaan edesauttaa järjestelmän luotettavuutta porrastamalla liikennöintiä latausta suosivasti. Odotus-/latausajan kasvattamisen ohella voidaan myös latausasemien tehoja lisäämällä varmistua riittävästä latauksesta lyhyempienkin pysähdysten yhteydessä, jonka seurauksena myös sähköistettävissä olevien linjojen määrää kasvaa (A: Xylia ym. 2017). Luotettavuuden saavuttamiseksi latauspisteiden sijoittelussa tulee ottaa itse verkoston ominaisuuksien lisäksi huomioon myös paikallinen sähköverkko ja sen kantokyky (Lehtinen ym. 2018; Mäkinen & Nap 2019). Pikalatauksessa hetkelliset kulutuspiikit voivat nousta verrattain suuriksi varsinkin, jos latausasemalla on tarkoitus ladata samanaikaisesti useita busseja (Rogge ym. 2015).

Laitteiston sijoittelun ja ominaisuuksien lisäksi myös valitulla teknologialla on erittäin tärkeä rooli toimintavarmuuden ja luotettavuuden varmistamisessa. Esimerkiksi LTO-akustojen (litiumtitanaatti) on tutkittu soveltuvan ominaisuuksiensa puolesta LFP-akustoja (litiumrautafosfaatti) paremmin pikalataukseen muuan muassa siksi, että LTO-akustot kestävät FLP-akkuja enemmän lataussyklejä, jolloin niitä ei tarvitse uusia yhtä usein (Vilppo & Markkula 2015). Lisäksi varaustasolla on tutkimusten mukaan vaikutusta akun eliniälle. Erkkilän ja

kumppaneiden (2019) tutkimuksessa huomattiin, että 20–100 prosentin välillä pysyvä lataus vähingoitti akustosoluja enemmän kuin 0–80 prosentin välillä pysyvä varaus. Samankaltaisia tuloksia akuston käyttöalueesta, eli varauksen vaihteluvälistä, jonka sisällä pysyttäessä akuston vaurioituminen on epätodennäköisempää, on saatu myös muista tutkimuksista (Kunith ym. 2014). Ylilatauksen estämiseksi laturin tehoa säännellään mitä lähempänä akun maksimi- tai minimikapasiteettiä ollaan. Lisäksi on havaittu, että myös keskiarvoisella varauksella, eli sillä mikä akun varaus tyypillisesti on, on vaikutusta akun elinikään: esimerkiksi 60 prosentin keskiarvoisella varauksella akun käyttöikä oli heikompi kuin 40 prosentin keskiarvoisella varauksella (Erkkilä ym. 2019). Akuston ominaisuudet kuten käyttöalue ja oletettu käyttöikä ovat riippuvaisia valitusta akkuteknologiasta. Kilpailutuksen yhteydessä tilaajan on osattava vaatia toimittajalta teknisesti luotettavina pidettyjen teknologioiden ja laitteistojen käyttöä.

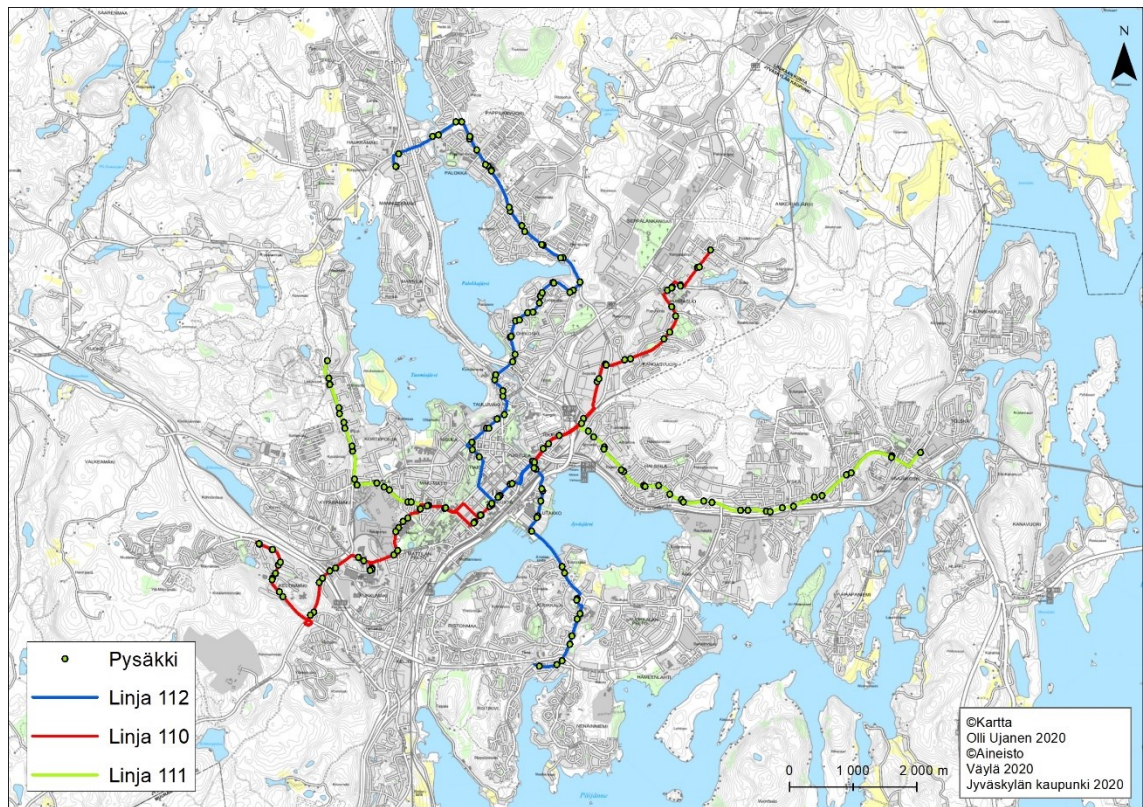
### 3. Tutkimusaineisto

#### 3.1 Reitti- ja nousija-aineisto

Tutkimusaineistona käytettiin Jyväskylän suunniteltujen runkolinjojen tietoja, jotka saatiin käyttöön Jyväskylän kaupungilta. Lisäksi Jyväskylän kaupunki toimitti nykyisten linjojen pysäkkikohtaiset nousutiedot, joita hyödynnettiin pysäkkikohtaisessa tarkastelussa. Nousutiedot käsittivät maanantai 4.11.2019 – lauantai 9.11.2019 välisen ajankohdan ja ne olivat tallennettu tunneittain (Liite 3). Ennen runkolinja- ja nousija-aineistojen tarkempaa esittelyä on hyvä huomioida, että tutkimuksen kanssa samanaikaisesti käynnissä oli myös runkolinjojen kartoitusprosessi, joka on osa Jyväskylän joukkoliikenteen kehittämisprosessia. Runkolinjojen keskeneräisen kartoituksen seurauksena tutkimuksen aikana runkolinjoja koskeva aineisto muuttui kartoitusprosessin edetessä. Tämän takia analyysissä on käytetty sekä vanhempaa runkolinja-aineistoa, joka toimitettiin 11.10.2019, että tuoreempaa runkolinja-aineistoa, joka perustuu 23.3.2020 saatujen tietojen mukaisiin runkolinjoihin. Tutkimuksen lopulliset tulokset perustuvat tuoreemmalla aineistolla tehtyihin analyysihin, mutta myös vanhemmalla aineistolla saadut tulokset ovat soveltuvilta osin edelleen relevantteja. Siksi tässä kappaleessa esitellään myös aikaisempi aineisto ja siihen liittyvän analyysin taustalla olevat määrittelyt niiltä osin, kun ne eroavat uudemmasta analyysistä. Tuloksien osalta aikaisempaa analyysia ei käydä seikkaperäisesti läpi, mutta tuloksena saadut kartat ja muu dokumentointi löytyy tutkimuksen

liitteistä (Liitteet 1 ja 2). Aikaisemman analyysin relevantit osat liittyvät pysäkkikohtaisiin ympäristötarkasteluihin, joissa selvitettiin maankäyttöön ja sähkön runkoverkon kantokykyyn liittyä rajoitteita latausasemainfran rakentamiselle. On hyvä myös tiedostaa, että työn palautushetkellä 22.6.2020, runkolinjojen kartoitusprosessi on edelleen käynnissä, eikä tutkimuksessa käytetty aineisto välttämättä vastaa lopullisia runkolinjoja.

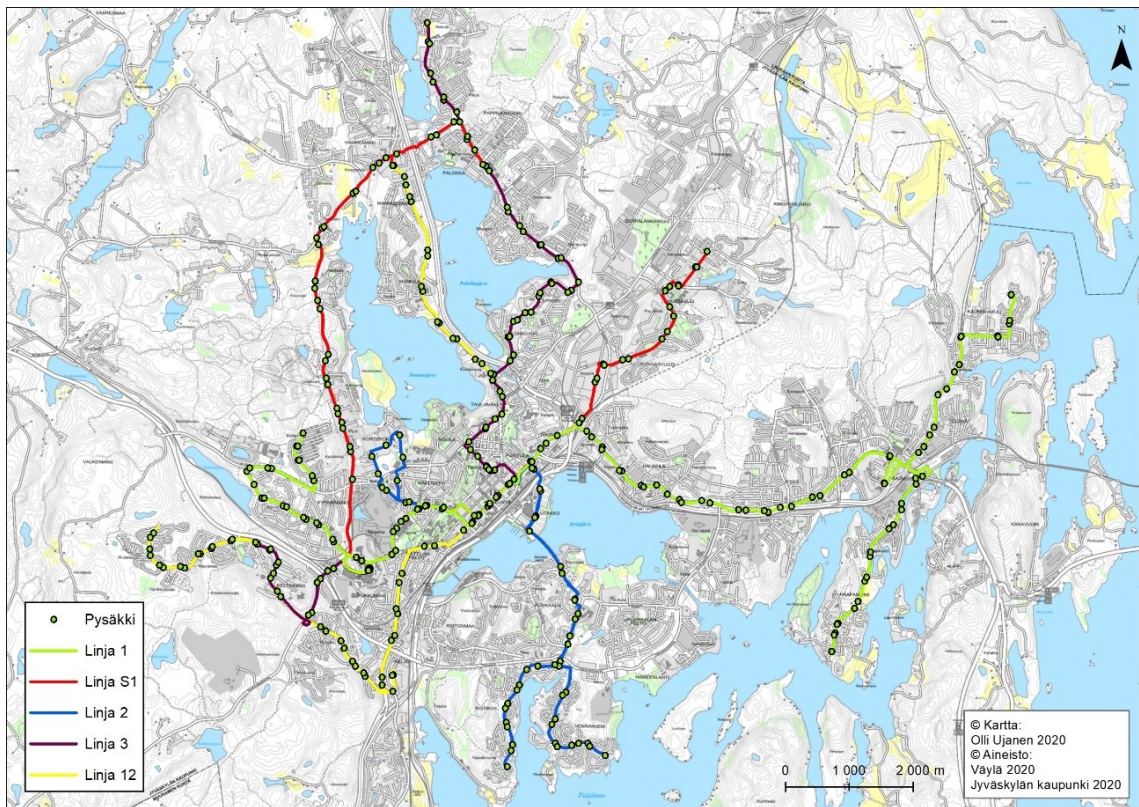
Aikaisemmin 11.10.2019 saatu runkolinja-aineisto toimitettiin GTFS-muodossa. GTFS (*General Transit Feed Specification*) aineisto koostuu vähintään kuudesta, mutta enintään kolmestatoista tekstitiedostoista, joiden tulee sisältää vähintään bussiverkoston yleistiedot, tiedot pysäkeistä ja pysähtymisajoista, reitti- ja matkatiedot sekä eri viikonpäivien aikataulut osoittava kalenteri. Näiden lisäksi GTFS-formaattiin voidaan esimerkiksi tallentaa myös tiedot reittien muodoista, hinnoittelusta ja vaihtopisteistä (GTFS Static overview 2020). GTFS-aineistojen tuontiin käytettiin ArcMapin lisäosaa Add GTFS to network dataset. Toimitettu GTFS-aineisto sisälsi tiedot kolmesta linjasta: linja 110 (superlinkki) ja runkolinjat 111 ja 112 (ks. Kuva 1). Superlinkin arvioitu liikennöintiväli oli 10min ja runkolinjojen 15min. Tutkimuksen kannalta oleellisia tietoja olivat pysäkkien ja linjojen sijainnit sekä aikataulut, joiden pohjalta laskettiin pysäkkien läpi kulkevan liikenteen määrä.



Kuva 1. 19.11.2020 aineiston mukaiset runkolinjaehdotukset.

Tuoreempi, 23.3.2020 toimitettu, runkolinja-aineisto oli Shape-formaatissa, joka on Esri kehittämä vektoripohjainen tiedostomuoto. Shape-formaatissa voidaan esittää kohteiden maantieteelliset sijainnit sekä niihin liittyviä ominaisuustietoja (B: Esri 2020). Toimitettu aineisto sisälsi pysäkkien sekä linjojen sijainnit, mutta ei aikataulutietoja. Linjojen määrä oli kasvanut aikaisemmasta kolmesta linjasta seitsemään ja lisäksi linjojen reitteihin oli tullut useita muutoksia. Käytännössä seitsemän uutta linjaa käsittivät A ja B osuuksia, jotka kuvasivat samalla linjalla eri suuntiin kulkevaa liikennettä, jolla saattoi olla linjan toisen pään haarautumisen seurauksena eri päätepysäkit. Latauspisteiden sijoittamisen kannalta eri päätepisteitä ei ole merkityksellistä kuvata omina linjoinaan, joten näistä seitsemästä linjasta oli johdettavissa viisi yksinkertaistettua linjaa (kuva 3).





Kuva 2. 23.3.2020 aineiston mukaiset linjaehdotukset

Linjat 1, 2, 3 ja 12 ovat runkolinjoja ja linja S1 "superlinkki", joka on verkoston päälinja. Pääasiallinen ero runkolinjojen ja superlinkin välillä on arvioitu liikennöintiväli, joka on superlinkissä noin 10min ja muissa noin 15min. Linjapituuden suhteen linja 2 eroaa huomattavasti muista linjoista ja ollen puolet linjaa 1 lyhyempi. Muiden linjojen linjapituudet ovat lähellä toisiaan. Tuoreemman aineiston mukaiset linjatiedot on kerätty alla olevaan taulukkoon 3.

Taulukko 3.23.3.2020 aineistoon perustuvat linjatiedot

Linja	Pituus A	Pituus B	Liikennöintitiheys
1	17990	20579	15min
S1	19052		10min
2	10004	10390	15min
3	17244		15min
12	17773		15min

## 3.2 Tieaineisto

Tieaineistona tutkimuksessa käytettiin Väylän hallinnoimaa valtakunnallista Digiroad-aineistokokonaisuutta. Se sisältää tietoja Väylän Tierekisteristä, Maanmittauslaitoksen Maastotietokannasta, kuntien katutietojärjestelmistä sekä muiden viranomaisten tietojärjestelmistä. Lopputuloksena on aineisto, joka sisältää tieliikenneverkon rakenteen, sijainnin sekä ominaisuustiedot, kuten kadunnimet, tieluokat, nopeusrajoitukset, kulkusuunnat ja kääntymisrajoitukset (Väylä 2020). Digiroad-aineistolla ei alkuperäisessä muodossaan voinut kuvata bussiliikenteen toimintaa tutkimuksen tarpeiden mukaisesti ja aineistoon tehtiin useita muokkauksia. Bussilinjat kulkevat kiinteitä reittejä pitkin, kun taas Digiroad-aineistossa oletuksena on, että kulku pisteestä A pisteeseen B on mahdollista kaikkia tieverkon osia hyödyntäen, kunhan liikkuminen tapahtuu annettujen sääntöjen (esim. kulkusuunta) mukaisesti. Tästä syystä Digiroad-aineistosta otettiin käyttöön vain ne tieosuudet, jotka olivat tarpeellisia bussilinjojen esittämiseen. Lisäksi Digiroad-aineistoon lisättiin uusia kääntymis- ja kulkusuuntarajoituksia estämään esimerkiksi liikenneympyröissä u-käännöksen tekeminen, väärälle bussilinjalle kääntyminen tai tiestä muodostuvan silmukan kiertäminen väärään suuntaan.

## 4. Menetelmä

Tutkimuksen toteutuksessa on kaksi päävaihetta: latauspisteiden sijoittaminen lokaatio-allokaatio-analyysin avulla sekä analyysillä saatuihin sijainteihin perustuvan bussiverkoston simulointi. Lokaatio-allokaatio valikoitui menetelmäksi liikenteestä syntyvää kysyntää paremmin mallintavan FCLM (Hodgson 1990) sijaan, koska nykyisellään paikkatieto-ohjelmistoissa ei ole FCLM tukevia työkaluja, vaan mallin käyttö vaatisi oman työkalun luomista. Simulaatiovaiheessa verkostoa mallinnetaan oliopohjaisen mallintamisen kautta ja simulointi pyritään toteuttamaan olio-ohjelmoinnin periaatteiden mukaisesti. Olioperusteinen lähestyminen sopii hyvin tutkimuksen yksilöitäviä muuttuja sisältävän ilmiön, eli bussien ja niiden toimintojen, mallinnukseen (Bian 2017).

Menetelmäkappale aloitetaan läpikäymällä graafiteoriaa, joka vaikuttaa sekä analyysi, että simulaatiovaiheiden taustalla. Tämän jälkeen katsotaan lokaatio-allokaatio-

analyysin perusteita ja analyysin käytännön toteutuksessa käytettyjä raja-arvoja sekä oletuksia. Viimeisenä esitellään olioperusteista mallintamista ja ohjelmointia ja käydään myös läpi simulaation käytännön toteutus ja siihen sisältyvät oletukset.

## 4.1 Graafiteoria

Graafiteoria on tapa kuvata, jäsentää ja tutkia erilaisia tosielämän aineellisia ja aineettomia verkostoja (Curtin 2017). Näitä voivat olla esimerkiksi tietojärjestelmät, tieverkko, liikennejärjestelmä tai sosiaalinen verkosto. Verkostoa kuvaava datamalli pohjautuu keskenään vuorovaikutuksessa oleviin tasoihin, joihin liitetään ominaisuuksia ja luokittelua, tai objekteihin, jotka kuvaavat verkoston elementtejä ominaisuuksineen sekä määrittäytymineen. Tutkittavaa verkostoa ei ole tarkoitus kuvata täysin todellisuuden kaltaisena, vaan tärkeintä on huomioida verkoston ominaisuudet ja osien väliset suhteet (Rodrigue ym. 2017). Verkostoa kuvaava piirros ei siis välttämättä muistuta ulkomuodoltaan kuvattavaa kohdetta. Verkostot esitetään solmujen (node) ja kaarien (edge) avulla, jotka esimerkiksi liikenneverkossa voivat yksinkertaisimmillaan kuvata risteyskohtia ja niiden välisiä osuuksia tai suuremmassa mittakaavassa kaupunkeja ja kaupunkien välisiä osuuksia. Verkoston tarkkuutta ja realistisuutta voidaan kasvattaa lisäämällä verkostoon solmuja ja kaaria kuvaamaan esimerkiksi pelkkien risteysalueiden lisäksi myös tien ominaisuuksien muutoksia (Miller & Shaw 2001). Kaarille ja solmuille on mahdollista antaa ominaisuuksia, joiden avulla voidaan määrittää muun muassa minkä arvoinen jokin solmu on verkostossa, paljonko jonkin kaaren läpikulkeminen ”maksaa” tai mihin suuntaan kaarta voidaan liikkua (yksisuuntaisuus) (Miller & Shaw 2001; Rodrigue ym. 2017). Solmuun tai kaareen lisättävällä tiedolla voidaan myös simuloida esimerkiksi nopeusrajoituksia tai liikennevaloja määrittämällä aikasakko solmun kautta kääntymiselle (Miller & Shaw 2001). Bussien tapauksessa voidaan solmuihin asettaa kääntymisrajoituksia, jotka pakottavat bussit kulkemaan ennalta määrättyä reittiä pitkin.

Luodun verkoston ominaisuuksia voidaan tarkastella useilla eri mittareilla solmujen ja kaarien lukumääristä verkoston kokonaismittaan ja volyymiin (Curtin 2017; Rodrigue ym. 2017). Verkoston osien välisten suhteiden perusteella voidaan esimerkiksi todeta verkon symmetrisyys, täydellisyys (kaikkien solmujen välillä on kaari) tai yhtenäisyys (jokainen solmu voidaan yhdistää muihin solmuihin ainakin yhtä reittiä pitkin) (Curtin 2017; Rodrigue ym. 2017).



Yksittäisten solmujen ja kaarien merkitystä koko verkoston kannalta voidaan mitata muun muassa theta indeksillä (läpikulkeva keskimääräinen liikenne), solmuun liittyvien kaarien määrällä ja solmun merkittävyydellä muille solmuille (Rodrigue ym. 2017). Verkostolle voidaan tehdä myös monimutkaisempia analyyseja, jotka jaetaan kolmeen keskeiseen kastiin: 1) sijaintien löytämiseen verkosta, 2) reititykseen verkostossa ja 3) verkoston virtausten analyysiin. Sijaintien etsimisessä pyritään tyypillisesti löytämään piste, joka joko maksimoi tai minimoi jonkin annetuista rajoitteista. Esimerkiksi kaupan yksiköiden optimisijainnit voidaan ratkaista p-mediaani ongelmana, jossa kauppayksikön sijainti määrittyy minimoimalla kysyntäetäisyyden keskiarvo (Curtin 2008).

## 4.2 Lokaatio-allokaatio analyysin perusteet

Lokaatio-allokaatio analyysi on yksi verkostoille tehtävien analyysien muodoista. Sen avulla pyritään etsimään verkostosta toiminnalle parhaiten soveltuvia sijainteja. Analyysissa toisistaan riippuvat palvelut ja toiminnot sijoitetaan (lokaatio) siten, että pystytään parhaiten vastaamaan maantieteellisesti jakautuneeseen kysyntään (allokaatio) (Church 2008). Analyysin perustan muodostavat kysyntäpisteet ja sijoitettavat pisteet, jotka kuvaavat laitoksia tai toimintaa, sekä verkosto tai alue, jossa molemmat pistetyypit sijaitsevat (Tanaka & Furuta 2017). Oleellista lokaatio-allokaatio-analyysissä on, että sillä voidaan etsiä järjestelmistä keskeisiä pisteitä, jotka mahdollistavat järjestelmän virtauksen liikkumisen mahdollisimman vähällä ”hinnalla” (esim. aika tai matka kustannus). Keskeisten pisteiden löytäminen myös auttaa tunnistamaan muuten järjestelmästä vaikeasti havaittavia virtauksia (Scott 1970). Lokaatio-allokaatio-analyysia voidaan soveltaa erityyppisiin sijoitusongelmiin, joissa voidaan haluta sijoittaa esimerkiksi ensivasteyksiköitä (Murray & Tong 2009), pyöräparkkeja (García-Palomares ym. 2012), terveydenhuoltopalveluita (Murawski & Church 2009) tai kouluja (Ndiaye ym. 2012). Lisäksi niitä voidaan käyttää esimerkiksi tietoliikenneyhteyksien suunnitteluun (Schietzelt & Densham 2003). Johtuen lokaatio-allokaatio analyysin lukuisista sovellusmahdollisuuksista sen ympärillä tehtävä tutkimus on runsasta ja poikkitieteellistä.

Lokaatio-allokaatio-analyysin historiassa sen keskeisimmät kehitysvuodet sijoittuvat 1950- ja 60-luvuille, mutta ensimmäiset viralliset lähestymistavat kehitettiin jo vuosisadan alkupuolella, jolloin Alfred Weber käytti normatiivista mallia löytääkseen

parhaimman sijainnin tuotantopaikaksi, siten että sen täytyi olla sopivan etäisyyden päässä sekä alkutuotannosta, että kaupoista (Schietzelt & Densham 2003). Alfred Weberin työtä jatkoi 1950- ja 60-luvuilla muun muassa Leon Cooper (1963), joka jatkokehitti Weberin ajatuksen pohjalta mallin, jonka pohjalta pystyttiin samanaikaisesti sijoittamaan, alkuperäisen mallin yksittäisen toiminnon sijaan, useampia toimintoja samanaikaisesti. Cooperin mallissa sijoittaminen tehtiin, siten että keskimääräinen matka kysynnän ja  $p$  toiminnon välillä oli mahdollisimman pieni. Syntyneitä malleja kutsutaan *p-mediaani* ongelmaksi.

*P-mediaani* ongelman lisäksi keskeisiä lokaatio-allokaatio-ongelmatyyppejä ovat peittävyys analyysit, kuten *p-center* ongelma, *set covering* ongelma (SCLP) ja *maximal covering location* ongelma (MCLP). Peittävyys malleja käytetään tapauksissa, joissa palvelun taso riippuu kysyntäpisteen ja sijoituspisteen välisestä etäisyydestä (Tanaka & Furuta 2017). *P-center* ongelmassa pyritään minimoimaan kaikkien kysyntäpisteiden maksimimatka suhteessa  $p$  sijoitettavaan toimintoon, kun taas *p-median* ongelmassa keskitytään minimoimaan keskimääräinen matka (Suzuki & Drezner 1996). SCLP ja MCLP ongelmat ovat hyvin lähellä *p-center* ongelmaa. SCLP pyritään sijoittamaan minimimäärä toimintoja, siten että kaikki kysyntä saataisiin tyydytettyä eikä mikään kysyntäpiste jäisi määritettyä maksimimatkaa kauemmaksi (Hakimi 1965; Snyder 2011). MCLP malli on kehitetty SCLP pohjalta, mutta erona on, että MCLP pyritään sijoittamaan  $p$  kappaletta toimintoja, siten että ne vastaisivat mahdollisimman suureen osaan kysynnästä. SCLP tavoin kaikkeen kysyntään vastaaminen ei ole MCLP tarpeellista (Church & ReVelle 1974; Marianov & Serra 1998). MCLP mallin etu SCLP malliin verrattuna on, että MCLP:ssä kyetään ottamaan paremmin huomioon taloudelliset tekijät, koska kaikkeen kysyntään vastaaminen ei ole mallissa pakollista (Church & ReVelle 1974). Kaikkeen kysyntään vastaamalla lopputulos voi olla käytännön kustannuksilta liian kallis toteutettavaksi. Yksi peittävyys -mallien sovelluskohde ovat ensivastakeskukset, sillä niiden sijainneista riippuvaisen vasteajan kasvaessa liian pitkäksi ei palvelun taso ole enää riittävä (Tanaka & Furuta 2017).

Eri ongelmatyyppien lisäksi lokaatio-allokaatio analyysijä voidaan jakaa jatkuviin malleihin, verkostomalleihin ja diskreetteihin malleihin. Jatkuviissa malleissa kysyntäpisteet ovat diskreettejä, mutta valitut sijainnit voivat sijaita missä vain jatkuvalla alueella. Vastaavasti diskreeteissä malleissa kysyntä- ja sijoituspisteet ovat diskreettejä ja verkostomallit taas perustuvat graafiteorian mukaisesti solmuihin ja kaariin (Tanaka & Furuta 2017). SCLP ja MCLP, kuten useimmat lokaatio -ongelmat, voidaan määrittää niin diskreetteinä kuin jatkuvina ongelmina (Snyder 2011). Kuten muissakin analyysissä on lokaatio-allokaatiossa ensiluokaisen

tärkeää kerätä riittävästi tietoa tutkittavasta ilmiöstä, jotta analyysia kyetään soveltamaan oikein. Usein likimääräinen ratkaisu, jossa ongelma on kuvattu hyvin, lähestymistapa valittu oikein ja raja-arvot realistiset, on parempi kuin täydellinen ratkaisu huonosti kuvattuun ja rajattuun ongelmaan. Esimerkiksi kysynnän realistinen arviointi on usein haastavaa, koska kysyntään voivat vaikuttaa esimerkiksi vuodenaika, sukupuoli, ikädemografiat tai kellonaika (Tanaka & Furuta 2017).

### 4.3 Analyysin käytännön toteutus

Lokaatio-allokaatio analyysi toteutettiin käyttämällä Esrin tarjoaman ArcMap paikkatieto-ohjelmiston Network Analyst -lisäosan työkaluja. Network Analyst -lisäosa tarjoaa useita toimintoja, kuten reitti ja palvelualue työkaluja, joiden avulla voidaan ratkaista yleisimpiä verkosto-ongelmia (A: Esri 2020). Lokaatio-allokaatio analyysi valikoitui tutkielman menetelmäksi, koska sillä on mahdollista löytää verkostosta sen toiminnan kannalta keskeisiä pisteitä (Scott 1970). Se antaa mahdollisuuden analysoida bussiverkostoa kokonaisuutena, joka on oleellista, jotta tehokkaasti hyödynnettävissä olevat solmukohdat löydetään (Lehtinen ym. 2018: 20; Pihlatie ym. 2019: 39). Tehokkuus on keskeistä, jotta löydetään taloudellisesti kannattavia, ja perinteisen bussitoiminnan kanssa samalla kustannustasolla olevia bussisähköistämiskäytöksiä.

Analyysin käytössä oleellista on asianmukaisesti jäsennelty aineisto ja substanssiteoriaan perustuvat määrittelyt ja raja-arvot (Tanaka & Furuta 2017). Pohja-aineistoja muokattiin aineistokappaleessa kuvatulla tavalla. Menetelmän läpikäyminen aloitetaan reitti- ja Digiroad-aineistojen pohjalta tehdyn Network datasetin luomisesta ja kysyntä- sekä sijoituspisteinä toimivien pysäkkipisteiden käytöstä. Lopuksi katsotaan analyysissa käytetyt määreet ja raja-arvot, sekä perustelut niiden käytölle.

Network dataset pohjautuu teoriakappaleessa läpikäytyyn graafiteoriaan, jonka avulla reaali maailman verkostomaisia ilmiöitä kuvataan solmujen ja kaarien avulla (Curtin 2017; Rodrigue ym. 2017). Tässä tapauksessa kaaret kuvaavat suoria tieosuuksia solmujen välillä ja solmut kuvaavat tieverkoston risteyskohtia ja liittymiä sekä bussiverkoston pysäkkejä. Network dataset muodostettiin siten, että linjojen päällekkäisiä osia, eli sijainteja, joissa useampi linja käyttää samaa tieosuutta, kuvattiin pääsääntöisesti yhdellä kaarella. Linjat kulkivat päällekkäin

lähinnä kaupungin keskustan tuntumassa, jonka kautta kaikki tutkimuksen bussinlinjat kiersivät. Poikkeuksellisesti yhdellä kaarella ei kuvattu linjojen päädyissä tapahtuvia päällekkäisyyksiä, vaan ne kuvattiin omina kaarina. Tähän toimintatapaan päädyttiin, koska haluttiin varmistaa, että analyysityökalu kykenee tunnistamaan linjojen väliset erot. Kaaret saatiin kuvaamaan bussilinjastoja realistisemmin asettamalla niiden välille kääntymisrajoitteita, joiden tarkoituksena oli estää poikkeaminen annetulta linjalta. Lisäksi Digiroad-aineistossa olevaa kulkusuunta -muuttujaa muokattiin tarpeen mukaan.

Reittiaineistosta tuotiin analyysia varten linjatietojen lisäksi pysäkkien ominaisuus- ja sijaintitiedot. Pysäkkien sijainteja korjattiin siten, että ne olivat kaaren kulkusuuntaan nähden oikealla puolella. Pysäkit edustavat analyysissa mahdollisia latauspisteiden sijoituspaikkoja (facility), sekä kysynnän synnyttäviä pisteitä (demand). Pysäkit ladattiin latauspisteiden sijoituspaikoiksi yksittäisinä kohteina karsimalla pois ne pysäkit, joiden ei teorian ja Jyväskylän joukkoliikenneasiantuntijoiden kanssa käytyjen keskustelujen pohjalta katsottu olevan realistisia sijoituspaikkoja latausasemalle. Vanhemman ja uudemman aineiston rajaukset perustuivat erilaisiin oletuksiin maankäytöllisistä rajoitteista. Vanhemmassa aineistossa maankäyttörajoitusten katsottiin osittain estävän keskustassa olevien keskeisten sijaintien käytön, kun taas uudemmassa aineistossa tätä rajoitusta ei ollut. Uudemmassa aineistossa etukäteiskarsintaa tehtiin teorian pohjalta niin, että sijoituspaikkoina suosittiin linjojen päädyissä, sekä keskeisillä sijainneilla olevia pysäkkejä. Päätepysäkit ovat usein käytännön toteutuksen kannalta paras valinta ja keskeiset sijainnit mahdollistavat latauspisteelle korkeamman käyttöasteen (Lehtinen ym. 2018; Pihlatie ym. 2019).

Kysyntäpisteet ladattiin ”päällekkäin”, jolloin jokaisen linjat käyttämät pysäkit ladattiin linja kerrallaan analyysiin. On hyvä huomioida, että pysäkkien käyttö kysyntäpisteinä ei ole optimaalinen ratkaisu liikenteen aiheuttaman kysynnän mallintamisessa, sillä kysyntä ei todellisuudessa keskity pisteisiin vaan esiintyy jatkuvina virtauksina. Mahdollisimman todenmukaisen abstraktion saavuttamiseksi kysyntäpisteissä pyrittiin huomiomaan kysynnän muutokset käyttämällä päällekkäisiä kysyntäpisteitä ja antamalla niille liikennemäärien mukaiset painotukset. Useamman linjan risteämispisteessä on siis jokaista linjaa kuvaava kysyntäpiste, jonka lisäksi kysyntäpisteelle on annettu erillinen painoarvo (weight) kuvaamaan kunkin linjan liikennemäärää. Painoarvo laskettiin linjalla keskimääräisesti tunnissa kulkevien bussien määrän perusteella: S1 linjan painoarvo oli 1,33 ja muiden linjojen painoarvo oli 1. Network datasetin kaarien ja kysyntä- / sijoituspisteiden välinen suhde määriteltiin siten, että

bussi kykenee lataamaan vain kulkusuunnastaa oikealla puolella olevasta pisteestä sijoittamalla pysäkit oikealle puolelle kaaren kulkusuuntaan nähden ja lisäksi määritettiin, että kysyntä- ja sijoituspisteiden oli sijaittava kaaren kulkusuuntaan nähden oikealla puolella, jotta ne ”kiinnittyvät” verkkoon (Curb approach). Sijoitettava latauspiste voi vastata vaan kulkusuuntaan nähden takaapäin tulevaan kysyntään, eli syöttää vain siihen saapuvaa liikennettä. Tämä varmistettiin määrittämällä kysynnän suunta kulkemaan kysynnästä (demand) sijoituspisteeseen (facility).

Bussien ominaisuudet määriteltiin siltä olettamukselta, että kaikkia busseja tulee pystyä tarpeen vaatiessa käyttämään kaikilla linjoilla ja kaikki käytettävät bussit ovat tyypiltään samankaltaisia. Vanhemmassa aineistossa suurimmaksi sallituksi latauspisteiden väliseksi etäisyydeksi määritettiin 18 kilometriä (Cutoff distance). Maankäyttörajoitteiden takia oletuksena oli, että keskeisille sijainneille sijoitettavat latauspisteet eivät välttämättä olisi symmetrisesti linjan varrella. Suurin sallittu etäisyys laskettiin siksi pidemmäksi kuin pisin linjapituus. Akuston maksimi kokona käytettiin 70kWh, joka vastaa muualla Suomessa käytössä olevaa kalustoa (Lehtinen & Kanerva 2017).

Vastaavasti uudemman aineiston analyysissä suurimpana sallittuna etäisyytenä käytettiin 15 kilometriä (Cutoff distance), jonka sisällä sijoitettavan kysyntäpiste kykeni vastaamaan kysyntään. Maankäyttörajoitusten poistuessa ja linjapituuksien kasvaessa oletuksena oli käyttää sijoitteluun pääasiassa keskeisiä sijainteja, jolloin latauspisteiden väli voisi olla huomattavasti linjapituutta pienempi. Samalla käytettyjä akkukokoja voitiin pienentää aikaisempaan analyysiin verrattuna. Valittu 15 kilometrin linjaväli tarkoittaa, että yksittäisen latauspisteen hajotessa latausväli ei nousisi millään linjalla yli 30 kilometrin. 30 kilometrin latausväli linjakierrossa vastaa 36kWh energiamäärää, kun oletetaan bussin kokonaiskulutuksen olevan 1,2kWh/km. Cutoff distancen määrittelyssä otettiin myös huomioon yksittäisen lataustapahtuman kesto, joka perustui oletukseen 600kW latausvoimien käytöstä. Tällöin poikkeustilanteessa 30 kilometrin matkalla tarvittava energiamäärä olisi mahdollista ladata noin neljässä minuutissa ja normaalisti toimittaessa 15 kilometrin matkalla latausaika olisi noin kaksi minuuttia. Latausaikojen on oltava riittävän pieniä, jotta niihin käytetty aika ei olisi merkittävästi normaalia pysähdystä pidempi. Yhtenä tekijänä latausvälin määrittämisessä oli myös akustojen käyttöikä, jonka kannalta liian suuret varausvaihtelut eivät ole suositeltavia (Rogge ym. 2015; Olsson ym. 2016). 36kWh kulutus tarkoittaa, että bussissa tulisi olla 60kWh akusto, jotta pysytään suurimpana sallittuna pidetyn 60 prosentin vaihteluvälin sisällä. Näin siis poikkeustilanteessa,

jossa yksittäinen latauspiste lopettaa toimintansa. Normaalitilanteessa latausvälin ollessa maksimissaan 15 kilometriä on varauksen vaihteluväli puolet tästä eli 30 prosenttia, joka jää jatkuvan käytön hyväksyttävän vaihteluvälin (50%) alle (Lehtinen & Kanerva 2017). 60Kwh akustokoko vastaa myös muilla suomalaisilla kaupunkiseuduilla käytössä olevaa kalustoa (Lehtinen & Kanerva 2017).

Lokaatio-allokaatio-analyysissa käytettiin ”Minimize facilities” ja ”Maximize coverage” ongelmatyyppejä sijaintien selvittämiseksi. Minimize facilities on set covering tyyppinen ongelma (SCLP) (Hakimi 1965; Snyder 2011), jossa pyritään minimoimaan sijoitettavien pisteiden määrän siten, että kaikki kysyntä tietyn määritetyn etäisyyden sisällä tyydytetään. Maximize coverage taas on maximal covering location (MCLP) (Church & ReVelle 1974; Marianov & Serra 1998) tyyppinen ongelma, jossa etsitään verkostosta keskeisimmät pisteet, joiden avulla voidaan tyydyttää mahdollisimman suuriosa kokonaiskysynnästä. Keskeinen ero ongelmatyyppien välillä on, että Maximize coveragessa voidaan valita haluttu määrä sijoitettavia kohteita, kun taas Minimize facilities ongelmatyypissä kohteita sijoitetaan niin paljon, että kaikki kysyntä tyydytetään.

Alkuperäisellä aineistolla analyysin perusteella laadittiin (11.10.2019) neljä erilaista skenaariota (Liite 1). Ensimmäisessä ja toisessa skenaariossa haettiin päätepysäkkeihin sekä tehokkaisiin sijainteihin pohjautuvat ratkaisut. Kolmannessa skenaariossa pyrittiin yhdistämään nämä kaksi aiempaa skenaariota ja neljännessä skenaariossa koitettiin keventää skenaarion kolme ratkaisua. Skenaariotyyppinen lähestymistapa nähtiin hyvänä ratkaisuna ja sitä lähdettiin soveltamaan myös uuden aineiston kanssa sillä erotuksella, että skenaarioita tehtiin vain kolme. Uudet skenaariot tehtiin aikaisempien skenaarioiden mukaisesti siten, että ensimmäisessä käsiteltiin puhdasta päätepysäkkilatausta, toisessa tehokkaita sijainteja ja kolmannessa näihin perustuvaa kevennettyä yhdistelmäratkaisua. Keskeinen ero uusien ja vanhojen skenaarioiden välillä on, että uusissa luovuttiin Vapaudenkadun oletetuista maankäyttörajoituksista ja sallittuina sijoituspaikkoina pidettiin reittien päädyissä, sekä limittäin kulkevien linjojen varsilla olevia pysäkkejä. Vastaavasti latauspisteitä ei sijoitettu näiden alueiden välisille pysäkeille (Ks. Kuva 3.) Tehdyt muutokset johtuvat kasvaneen aineiston mukanaan tuomista haasteista analyysin suorittamisessa ja sekä työn tilaajan että tekijän muuttuneista käsityksistä koskien Jyväskylän seudun maankäytöllisiä haasteita ja mahdollisuuksia.

Analyyseilla löydettyjä sijainteja arvioitiin 11.10.2019 aineiston osalta Jyväskylän kaupungin joukkoliikenneasiantuntijoiden ja paikallisen verkkoyhtiön Alvan edustajan kanssa. Alvan edustaja avasi verkkoyhtiön kantaa sähköverkkorungon kestävydestä ja liitettävyydestä (Liite 2), jota on pidetty yhtenä mahdollisena haasteena bussiverkkojen sähköistämisessä (Lehtinen & Kanerva 2017). 23.3.2020 saadun aineiston tuloksia arvioitiin Jyväskylän kaupungin joukkoliikenneasiantuntijoiden kesken.

#### 4.4 Olioperusteisuus mallinnuksessa ja ohjelmoinnissa

Tutkimuksessa tehty simulaatio perustuu oliopohjaiseen ajatteluun, joka voidaan mieltää ilmiöiden käsitteellistämisen, tiedon järjestämisen ja käytännön toteutuksen kautta. Tässä kappaleessa käydään läpi yleisiä mallinnuksen periaatteita, kerrotaan millä tavoin olioperusteisuus liittyy mallinnukseen ja mitkä ovat sekä mallinnuksessa, että ohjelmoinnissa nähtävät oliopohjaisen ajattelun pääperiaatteet.

Tilan mallinnusta voidaan hahmottaa kolmen abstraktin tason kautta: 1) käsitteelliset mallit, 2) spatiaaliset mallit sekä 3) spatiaaliset datarakenteet. Käsitteelliset mallit liittyvät oleellisten spatiaalisten komponenttien ja niiden välisten suhteiden hahmottamiseen. Nämä ovat riippuvaisia mallinnuksessa käytettävästä spatiaalisesta mittakaavasta, ilmiön rajautuvuudesta ja ilmiön attribuuteista. Niiden perusteella voidaan esimerkiksi päätyä hahmottamaan ilmiötä yksittäisten objektien tai laajempien tasojen kautta. Spatiaaliset mallit liittyvät käsitteellisten mallien formalisointiin, joka vektorien tapauksessa tarkoittaa perusgeometrioita; viivoja, pisteitä ja polygoneja. Spatiaaliset datarakenteet pitävät sisällään formalisoinnin viemisen laskennalliseen ympäristöön eli missä muodossa dataa on tarkoitus käsitellä (Bian 2017). Mallinnuksen eri tasoja voidaan myös jaotella eri tavoin (looginen malli vs. spatiaaliset data rakenteet), mutta keskeistä on, että datamallinnus on aina edellä kuvatun mukainen hierarkkinen prosessi, jossa liikutaan yleisestä yksityiskohtaisempaan päin (Ahearn 2008).

Olioperusteisuus on mallinnuksessa ja ohjelmoinnissa käytetty näkökulma, joka tarjoaa keinoja käsitteellistää ilmiöitä (tuottaa käsitteellisiä malleja) ja toteuttaa luodut abstraktiot koodina (spatiaalinen malli ja datarakenne). Olioperusteinen lähestymistapa pitää sisällään muuan muassa 1) olioperusteisen analyysin, 2) olioperusteisen suunnittelun sekä 3)

olioperusteisen ohjelmoinnin (Bian 2007). Alun perin olioperusteisuus on kehitetty maantieteen piirin ulkopuolella ja siten kaikkia siihen sovellettavia käytäntöjä ei kannata siirtää spatiaalisesti tapahtuvien ilmiöiden mallinnukseen ja tutkimukseen. Parhaiten olioperusteisuuden kautta voidaan mallintaa spatiaalisia objekteja ja vielä kohtuullisesti sillä voi mallintaa spatiaalisia alueita. Kuitenkin tasopintoina kuvattavien ilmiöiden, kuten lämpötilan tai väestötiheyden, mallinnus oliona on haastavaa (Bian 2007). Olioperusteiset datamallit ovat suunniteltu identiteettien yksilöimiseen, diskreetteihin muotoihin sekä attribuuttien ja toimintojen kapselointiin, jonka seurauksena erityisesti vektorien formalisointi olioina on yksinkertaista (Bian 2017). Tässä tutkimuksessa olioperusteisuutta sovelletaan simulaatiovaiheessa bussien, pysäkkien ja reittien mallinnukseen ja mallin toteuttamiseen, johon olioperusteisuus sopii ominaisuuksiensa puolesta hyvin.

Olioperusteisen lähestymistavan keskeisiä periaatteita ovat luokittelu, yleistäminen, perintä, kapselointi, aggregaatio ja assosiaatio (Egenhofer & Frank 1992; Ahearn 2008; Bian 2017). Ilmiön ominaisuuksien pohjalta tehtävä yleistäminen mahdollistaa ilmiötä kuvaavien objektien luokittelun ja luokkien jakamisen karkeasti pääluokkiin, aliluokkiin ja abstrakteihin luokkiin. Pääluokat kuvaavat ilmiötä yleisemmällä tasolla ja sen alla olevat aliluokat ovat pääluokan erikoistumia (Egenhofer & Frank 1992). Esimerkiksi pääluokka voi olla AJONEUVO, jonka erikoistuneita aliluokkia ovat HENKILÖAUTO, KUORMA-AUTO ja BUSSI. Pääluokka – aliluokka jaotteluun kuuluu oleellisena perintä, jolla tarkoitetaan, että aliluokassa toistuvat kaikki pääluokassa määritetyt ominaisuudet. Aliluokka voi myös periä useamman kuin yhden pääluokan, jolloin se perii molempien pääluokkien ominaisuuksia. Aiemmin mainittuja abstrakteja luokkia ei voi itsessään synnyttää (esim. AUTO), mutta ne toimivat muottina niiden pohjalta luotavilla alaluokille (Ahearn 2008). Luokkien mukaan muodostettujen objektien erona ovat niiden sisäiset arvot, jotka antavat objekteille niiden identiteetit.

Mallinnettujen luokkien tiedot saadaan sisällytettyä yksittäiseen objektiin käyttämällä kapselointia. Kapseloinnilla tarkoitetaan, että objektin identiteetin, attribuuttien sekä toimintojen yhdistämistä yhdeksi toiminnalliseksi paketiksi, jolla kuvastetaan mallinnettavaa ilmiötä tai sen osaa (Ahearn 2008; Bian 2017). Luodun olio-objektin näkökulmasta on keskeistä, että objekti tietää mikä se on (attribuutit) sekä mitä se voi tehdä (metodit). Esimerkiksi bussi tietää olevansa bussi, omaavansa 60kWh akuston ja pystyvänsä liikkumaan tiettyjen pysäkkien välillä. Objektit osaavat ohjata toimintaansa myös ulkoa tulevien viestien perusteella. Ulkoa tulevat viestit kulkevat rajapinnan läpi, jonka avulla on mahdollista



tarkasti määrittää miten ja mitä tietoja on mahdollista muokata. Lisäksi objektien muodonmuuntelun (polymorphism) avulla useat eri olioluokat voivat ymmärtää samanlaiset viestit ilman suuria muutoksia olemassa olevaan koodiin (Ahearn 2008). Tämä toimintatapa edesauttaa datan eheyttä.

Luotuja luokkia voidaan lisäksi ryhmitellä, ja niiden välisiä suhteita havainnoida, aggregaation ja assosiaation avulla. Aggregaatiolla tarkoitetaan luokan muodostamista muista luokista, niin että ne ovat osa suurempaa kokonaisuutta (Egenhofer & Frank 1992; Bian 2017). Esimerkiksi KAUPUNKIPYÖRÄT, BUSSIT ja METRO voisivat muodostaa luokan PAIKALLISLIIKENNE. Assosiaatio taas viittaa mahdollisuuteen muodostaa luokkien välille yhteyksiä ja suhteita, joiden perusteella muodostuu ryhmiä (Egenhofer & Frank 1992; Ahearn 2008). Esimerkiksi tiellä on yhteys muihin teihin, mutta myös kevyenliikenteenväyliin ja bussipysäkkeihin.

Olioperusteinen mallinnuksen vahvuus on, että se mahdollistaa reaalimaailman ilmiöiden realistisemman abstraktion edellä mainittuja ominaisuuksia hyödyntämällä (Ahearn 2008). Olioperusteisuus muistuttaa ihmisten kognitiivisia prosesseja kapseloimalla objektit luokittain ja muodostamalla hierarkioita eri luokkien välille (Bian 2007). Perinteisiin mallinnustapoihin, kuten, rasteri ja vektori mallinnukseen, verrattuna oliopohjainen mallinnus tarjoaa työkaluja realistisempaan tosielämän kuvaukseen, koska 1) abstraktion pohjana ovat reaalimaailman objektit itsessään, eikä niihin liitettävä geometria, 2) topologia voidaan määrittää kaikkien entiteettien, eikä vain samaa tyyppiä olevien välillä, 3) suhteita ja yhteyksiä objektien välillä voi olla useita ja lisäksi 4) periminen, kapselointi ja muodonmuutos antavat uusia työkaluja mallinnukseen. Oliolla voi siten olla useita eri geometrioita, kuten esimerkiksi TIE-oliolla tien keskilinja (line) sekä tiealueen sijainti (polygon) (Ahearn 2008).

## 4.5 Simulaation käytännön toteutus

Paikkatietoanalyysissa saatuihin latauspistesijainteihin perustuvaa bussiverkostoa ja sen toimintaa simuloitiin sitä varten kirjoitetun ohjelman avulla (Liite 4) Ohjelmointikielenä käytettiin Pythonia (versio 3.8.0). Python on suosittu korkeanasteen ohjelmointikieli sen helppokäyttöisyyden takia, mutta se tarjoaa lisäksi monipuoliset rajapinnat (esim. ArcMap,

matlab, PostgreSQL) ja tieteellisissä laskennoissa käytettäviä kirjastoja (NumPy, SciPy), jotka antavat mahdollisuuden jatkokehittää simulaatioita osaksi suurempaa kaikenkattavaa mallia.

Simulaatio-ohjelmassa ongelman kuvaaminen ja ohjelmistokoodin sekä aineiston jäsentely perustuivat olioperusteisen lähestymistavan pääperiaatteisiin. Jokaista järjestelmän toiminnan kannalta oleellista tekijää kuvataan oman luokkamääreen kautta. Aineistona simulaatiossa käytetään linjojen, pysäkkien ja bussien ominaisuustietoja, jotka tallennetaan tekstitiedostoiksi. Simulaatiossa bussia ”ajetaan” aineiston mukaisilla linjoilla haluttu matka (oletus 300km) tallentaen bussin sijainti ja tila kilometrin välein, sekä jokaisen pysähdyksen yhteydessä. Pysähdyksen yhteydessä bussia voidaan ladata riippuen pysäkin latausmahdollisuudesta. Latauksen oletetaan olevan häviötöntä ja lataustehon pysyvän samana koko lataustapahtuman ajan. Kulutus perustuu johdannossa esitettyihin lukuihin Suomessa saaduista ja käytetyistä kulutuslukemista, eikä siinä olla huomioitu esimerkiksi pinnanmuotojen aiheuttamaa vaihtelua.

Simulaatiossa on pyritty huomioimaan poikkeustilanteet, joissa jokin linjan varrella oleva latausasema lakkaa toimimasta. Mikäli latausasema lopettaa toimintansa allokoidaan sen latausaika tasan muiden latausasemien kesken ja toiminnan lopettanut latausasema ohitetaan lataamatta. Akuston varauksen tippuessa ajon aikana alle asetetun prosenttimäärän simulaatio aloitetaan alusta muuttamalla joko akuston kokoa, latausaikaa tai bussin kulutusta. Simulaatiossa on myös mahdollista muuttaa pysäkkien lataustehoja. Simulaatio katsotaan suoritetuksi onnistuneesti silloin, kun akuston varaus ei koko matkan aikana (300km) laske asetetun raja-arvon (30%) alle.

Lähtöarvoina simulaatiossa käytetään samoja ominaisuusarvoja, kuin mihin lokaatio-allokaatio analyysi perustui: 60kWh akusto, 600kW laturi, akuston minivaraus 30% ja vaihteluväli maksimissaan 60%. Taulukkoon 4 on vielä lyhyesti koottu tärkeimmät analyysissä ja simulaatiossa käytetyt kuvaavat oletusarvot. Analyysien osalta latausaika kuvaa maksimietäisyyden kulkemiseen käytetyn energiamäärän lataamista oletuslatausteholla. Simulaation latausaika perustuu myöhemmässä pysäkkikohtaisessa tarkastelussa saatuun arvoon. Simulaation ja analyysin latausaikoihin on lisätty 60 sekunnin telakoituminen, joka pitää sisällään latausyhteyden luomisen, laitteiston käynnistämisen ja muut ennen varsinaista latausta suoritettavat toimet. Varsinaiseen energian lataukseen simulaatiossa on siis varattu 80 sekuntia. Simulaatioita suoritetaan myös oletusarvoista poikkeavilla arvoilla tarkoituksena

selvittää muuttujien muutosten vaikutus bussijärjestelmän toimintaan, mutta näihin palataan tarkemmin tuloksien esittelyssä.

*Taulukko 4. Analyysissä ja simulaatiossa käytetyt oletusarvot.*

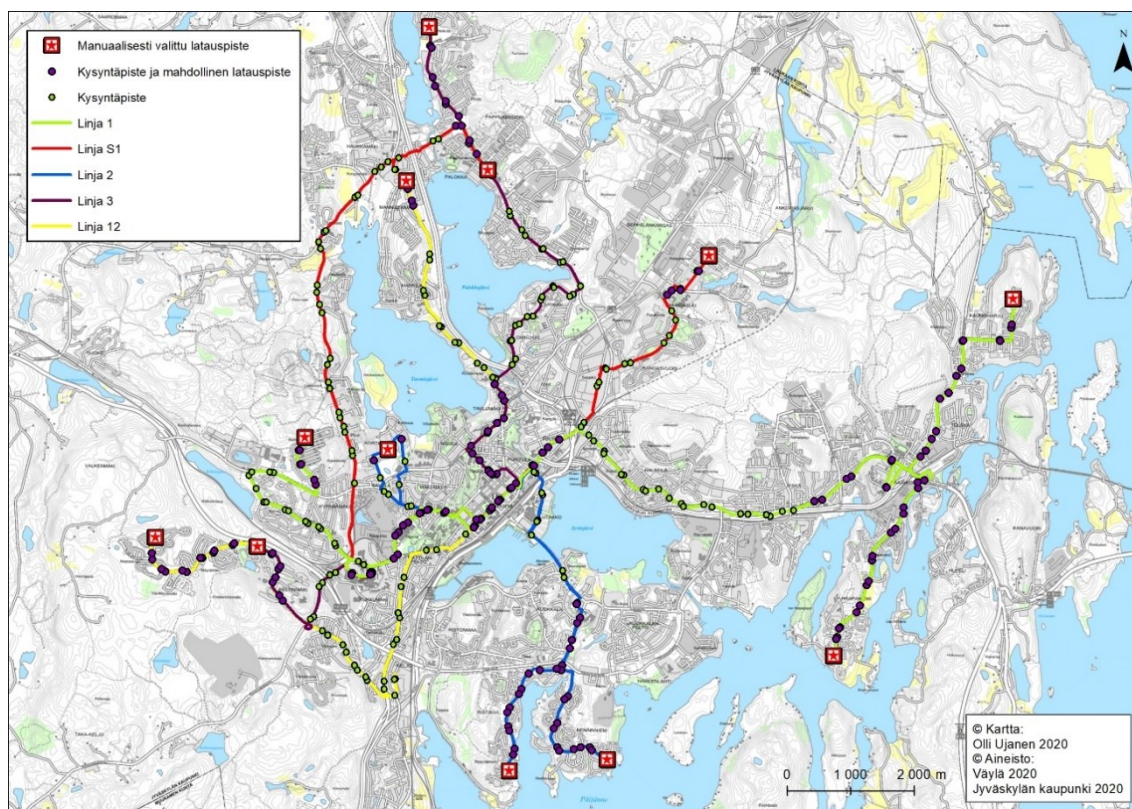
Käytetty	Kulutus (kW/km)	Latausaika (sek)	Akustokoko (kWh)	Latausteho (kW)	Maksimi etäisyys (km)	Varauksen vaihtelu (%)	Minimivaraus (%)	Operointisäde (km)
Analyysi 19.11	1,2	260	70	600	36	60	30	-
Analyysi 23.3	1,2	220	60	600	30	60	30	-
Simulaatio	1,2	140	60	600	30	60	30	300

## 5. Tulokset

### 5.1 Lokaatio-allokaatio

#### 5.1.1 Skenaario 1 – Päätepysäkkilataus

Ensimmäinen skenaario perustuu puhtaaseen päätepysäkkilataukseen, jossa latausasemia ei sijoiteta ollenkaan keskellä reittiä sijaitseviin pisteisiin (Kuva 3). Linjat 1 ja 2 haarautuivat päistä, jonka seurauksena latauspisteitä oli sijoitetta viidelle linjalle yhteensä 12 kappaletta. Latausväli oli lyhimmillään noin 10 kilometriä linjalla 2 ja pisimmillään noin 20 kilometriä linjalla 1. Skenaariossa latauspisteet on sijoitettu manuaalisesti kartalle. Normaalitilanteessa bussin energian tarve per linjapituus on linjalla 1 noin 24kWh, joka tarkoittaisi molemmissa päissä noin 3 minuutin latausaikaa laturin teho ollessa 600kW. Vain toisen laturin toimiessa latausaika olisi noin 6 minuuttia. Vaadittava akustokapasiteetti olisi tässä skenaariossa vähintään 80kWh, jotta akuston varauksen vaihtelu pysyy alle 60 prosentissa.



Kuva 3. Skenaario 1 - Päätepysäkkilataus.

Päätepysäkkilatauksen vahvuus on lataustapahtuman helppo sovittaminen päätepysäkeillä luonnollisesti tapahtuvan aikataulun tasauksen yhteyteen. Silloin lataus ei vaikuta asiakkaan matka-aikoihin eikä siten asiakkaan palvelukokemukseen. Latauksen aikataulutus on myös yksinkertaista, koska pysäkeillä ladataan lähtökohtaisesti vain yhden linjan kalustoa, jolloin latauspisteen ruuhkautuminen ei ole yhtä suuri riski, kuin jos latausasemaa käytetään useiden eri linjojen toimesta. Lataustapahtuman kesto ja lataustarve on myös helposti laskettavissa, koska latausväli on aina linjan pituus. Näiden tekijöiden lisäksi päätepysäkkisijaintien vahvuutena voidaan nähdä Jyväskylän tapauksessa keskeisten sijaintien ahtausta, joka vaikeuttaa latausasemien sijoittamista reitin varrelle tai ainakin se vaatisi bussiverkon sähköistämisen huomioon ottamista aikaisempaa laajemmin muun muassa kaavoituksessa. Bussijärjestelmän sähköistäminen päätepysäkkiskenaarion pohjalta olisi käytännön ratkaisujen kannalta helpohkoa muihin skenaarioihin verrattuna.

Skenaarion heikkoutena ovat infrastruktuurin suuri tarve sekä suuret akustot, joiden seurauksena investointikustannukset nousevat. Lisäksi yksittäisestä latausasemasta saatu hyöty voi jäädä alhaiseksi, jos päätepysäkki on vain yhden linjan käytössä. Myös verkoston

jatkokehittäminen on haasteellista, koska päätepysäkkien käyttöä voi olla vaikeaa ennustaa useiden vuosien päähän. Latausinfra sijaintien suunnitteleminen kymmenen vuoden aikajänteellä on nostettu yhdeksi keskeiseksi haasteeksi myös muissa sähköistämishankkeissa (Lehtinen & Kanerva 2017). Päätepysäkkilatauksessa on myös tiedostettava järjestelmän haavoittuvuus, kun liikennöinti on vain kahden latauspisteen varassa, vaikkakin molempien laturien yhtäaikaista rikkoutumista ei voida latauslaitteista saatujen kokemusten perusteella pitää kovin todennäköisenä tapahtumana (Eudy & Jeffers 2017; Lehtinen & Kanerva 2017).

### 5.1.2 Skenaario 2 – Tehokas latausasemien sijoittelu

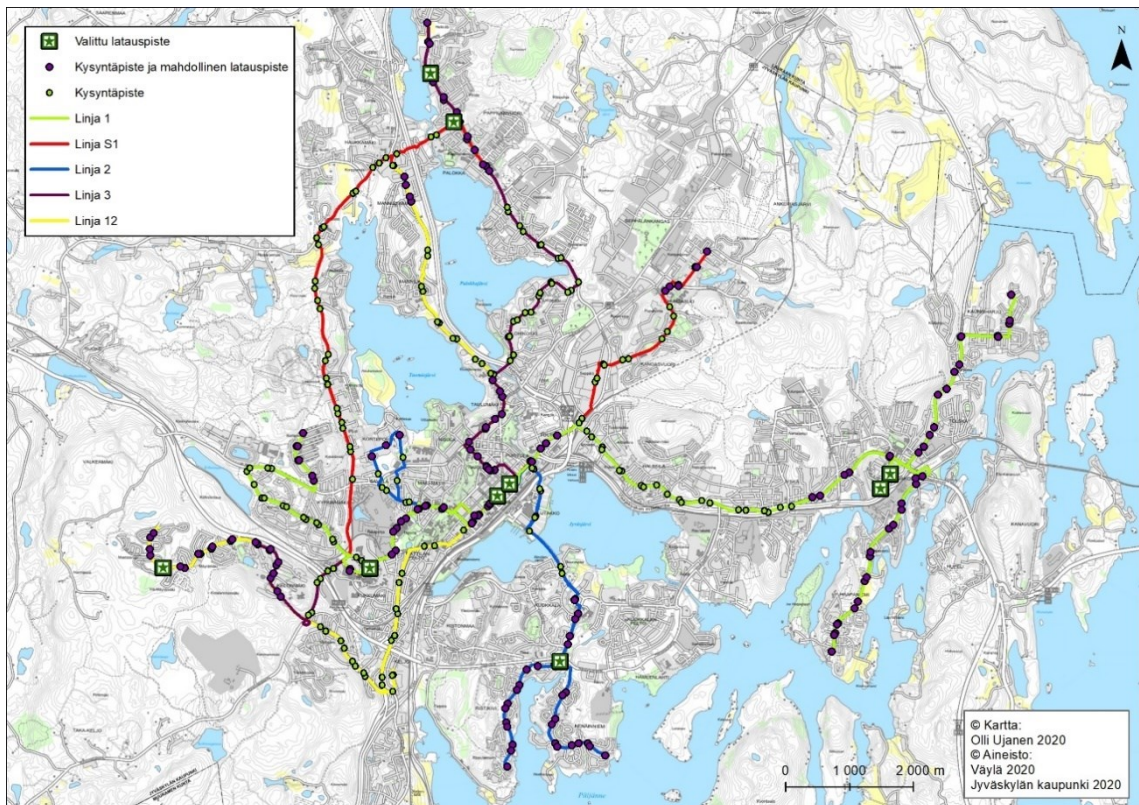
Skenaariossa kaksi haettiin mahdollisimman tehokkaita latausasemasijainteja, siten että ne pyrittiin sijoittamaan niin sanottuihin hotspotteihin, joissa laitteistolle saataisiin mahdollisimman korkea käyttöaste (kuva 4). Latauspisteitä sijoitettiin yhteensä yhdeksän kappaletta, siten että latauspisteiden välinen etäisyys vaihteli 3–14 kilometrin välillä. Poikkeustilanteessa latausväli olisi enintään 28 kilometriä ja akustojen kapasiteetiksi riittää tällöin 56kWh. Normaalitilanteessa lataustapahtuma olisi noin 2 minuuttia pisimpien latausvälien linjoilla, Poikkeustilanteessa latausaika nousisi reiluun kolmeen minuuttiin.

Skenaarion hyvänä puolena ovat alhaisemmat investointikustannukset. Latauslaitteita tarvittaisiin yhteensä yhdeksään sijaintiin ja akustojen mitoitus voidaan pienempien latausvälien takia kutistaa. Keskeisten latausasemasijaintien pohjalta sähköbussiverkon laajentaminen on myös tulevaisuudessa mahdollista. Luotettavuutta voidaan pitää kohtuullisena, koska jokaisen bussilinjan varrelle on sijoitettu vähintään kolme, ja joissain tapauksissa neljä, latauspistettä. Latauspisteiden avulla voidaan myös jakaa lataustapahtuma useammassa pisteessä suoritettavaksi, jolloin lataukseen kuluva aika ja normaali bussin pysähtymisaika ovat paremmin yhteensovitettavissa. Tämä on keskeistä, jotta matkustajien kokemukset joukkoliikenteen käytöstä pysyvät mahdollisimman positiivisina.

Skenaarion heikkoutena ovat maankäytölliset haasteet sekä yksittäisten sijaintien korkeat käyttöasteet. Erityisesti keskustan alueelle sijoitettujen latauspisteiden sijoittaminen ja rakentaminen osaksi kaupunkikuvaa tuovat mukanaan haasteita. Käyttöasteita kuvaa hyvin se, että kaksi keskustan latauslaitetta vastaa noin 50 prosentista koko verkoston lataustarpeesta. Käytännön kannalta keskustaan olisi siis sijoitettava useita latauslaitteita, jotta kaikkia ohi



ohikulkevia ajoneuvoja voitaisiin ladata. Tämä ei välttämättä ole mahdollista tilanpuutteen takia. Latauspisteet myös sijoittuvat bussiverkoston epätasaisesti, jonka seurauksena latausväleissä on suurta vaihtelua (3-14km). Analyysissa ei pystytty huomioimaan linjan 3 ja linjan S1, sekä linjan 3 ja linjan 12 päällekkäisten osuuksien hyödyntämistä keskeisinä latausasemasijainteina.



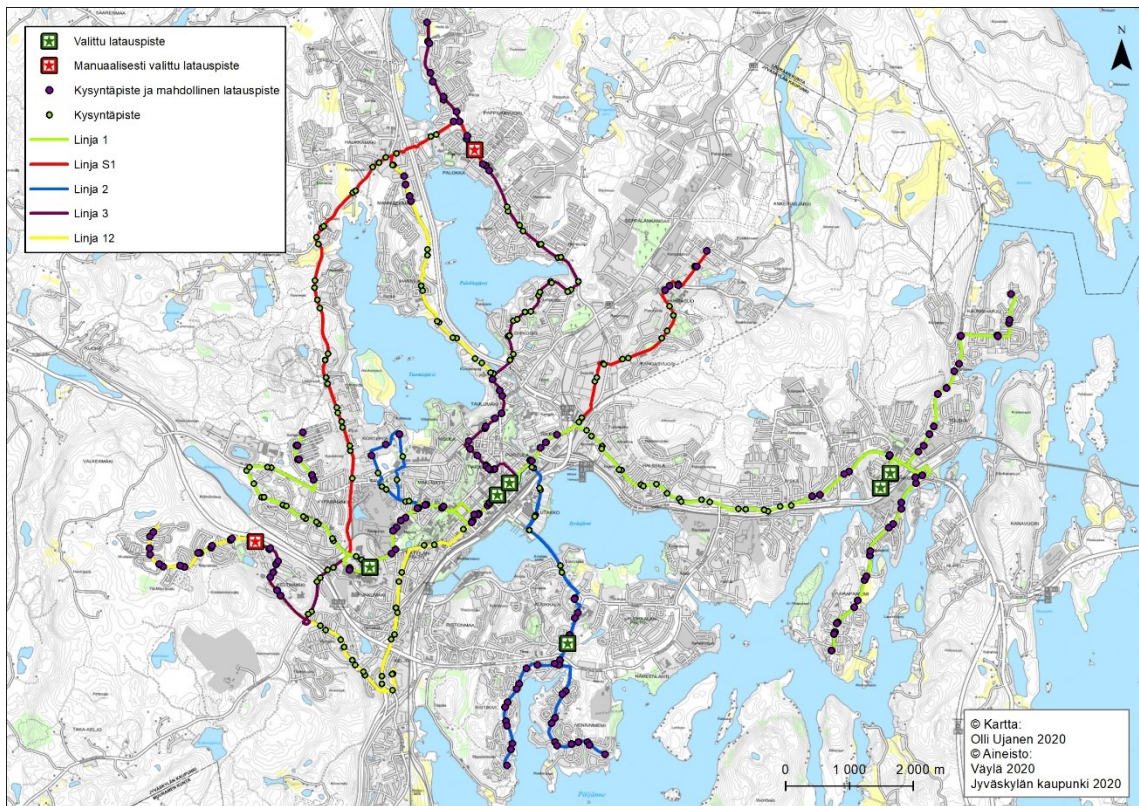
Kuva 4. Skenaario 2 – Tehokas latausasemien sijoittelu

### 5.1.3 Skenaario 3 – Parannellut latausasemien sijainnit

Skenaariossa kolme yhdistettiin skenaarioissa yksi ja kaksi saatuja tuloksia, siten että niiden väliltä löydettäisiin paras mahdollinen ratkaisu. Skenaarion kaksi analyysia oli mahdollista parantaa erityisesti linjojen S1 ja 12, sekä 3 ja 12 osalta. Analyysityökalu ei kyennyt ottamaan huomioon osittain päällekkäin kulkevien linjojen varrella olevien pysäkkien yhteiskäyttöä, joten jokaiselle linjalle asetettiin omat latauspisteensä. Erilliset latauspistesijainnit yhdistettiin manuaalisesti linjojen S1 ja 3 päätepysäkeille ja nämä kohteet toimivat analyysissä pakollisina latauspisteinä (Kuva 5). Tämän muutoksen avulla latauspisteiden määrä pystyttiin pienentämään yhdeksästä pisteestä kahdeksaan. Pakollisten latauspisteiden asettamisella oli

marginaalinen vaikutus muiden latauspisteiden sijainteihin, joka kertoo, että ne olivat jo valmiiksi hyvillä sijainneilla. Muutokset tapahtuivat Keskustan ja Kuokkalan latauspisteillä, joissa sijainti muuttui yhden pysäkkivälin verran. Latausvälit pysyivät samoina kuin skenaariossa kaksi, eli 3 ja 14 kilometrin välillä. Siten poikkeustilanteen latausväli (28km), akustokapasiteetti (56kW) ja latausaika (2-3min) ovat samat. Skenaarion kolme heikkoudet ja vahvuudet ovat myös skenaarion kaksi kanssa pitkälti yhteneviä. Vahvuuksissa korostuu entistä matalammat taloudelliset kustannukset latausinfrastruktuurin vähentyessä. Lähes kaikkien latausasemien ohi kulkee vähintään kahden eri linjan liikennettä, jolloin yksittäisten laitteistojen käyttöastetta on mahdollista nostaa. Tästä poikkeuksena ovat linjan 2 latauspiste Kuokkalassa ja linjan 1 latauspisteet Vaajakoskella. Vähentyneistä latauspisteistä huolimatta jokaisen linjan varrella on edelleen vähintään kolme latauspistettä, joka parantaa bussijärjestelmän luotettavuutta.

Skenaarion heikkoutena ovat keskeisten sijaintien käyttöön liittyvät käytännön haasteet. Erityisesti vapaudenkadulla sijoitettujen latausasemien osalta on tehtävä huolellinen selvitystyö rakentamisen mahdollisuuksista. Samoin latausasemien yhtäaikainen käyttö vaatii huolellista etukäteissuunnittelua, jotta vältetään haitallinen ruuhkautuminen.

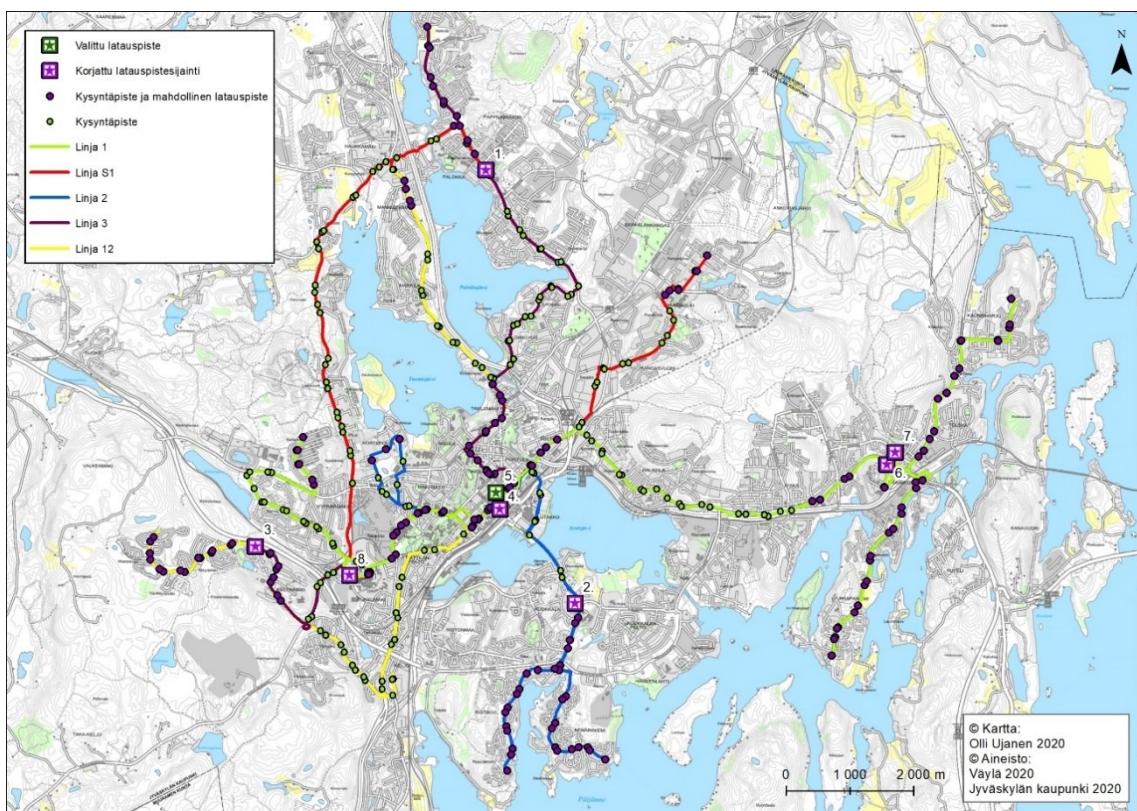


Kuva 5. Skenario 3 - Parannellut latausasemien sijainnit



#### 5.1.4 Lopulliset latausasema sijainnit

Skenaarioon kolme tehtiin vielä muutoksia yhdessä Jyväskylän joukkoliikenneasiantuntijoiden kanssa käydyn keskustelun pohjalta (Kuva 6). Sijainteihin tehdyt muutokset olivat pieniä ja käsittivät analyysin pohjalta saatujen sijaintien hienosäätöä. Analyysin tulosten jälkitarkastelu ja hienosäätö olivat tarpeellisia, koska analyysissa ei kyetty huomioimaan maankäytöllisiä tekijöitä pysäkkikohtaisesti. Tämän seurauksena analyysissa valittu pysäkki ei välttämättä ollut latausaseman rakentamisen kannalta optimaalinen.



Kuva 6. Lopulliset latausasema sijainnit

Suurin muutos kohdistui Kuokkalan latauspisteeseen, jota siirrettiin neljä pysäkkiväliä alkuperäisestä sijainnistaan pohjoiseen Kuokkalan kaarelle. Kuokkalan kaari oli tullut esille potentiaalisena latausaseman sijoituspaikkana jo syksyllä tehdyssä analyysissa (Ks. Liite 1). Kuokkalan kaaren vahvuus latausaseman sijaintina perustuu siihen, että kohteen kautta kulkee jo nykyisin useita linjoja ja se on myös tulevaisuudessa yksi todennäköisesti keskeinen sijainti Jyväskylän bussiverkostossa. Latausaseman siirron seurauksena kaikki skenaariossa esitettävät sijainnit palvelevat, tai ainakin niillä on mahdollista palvella, useiden linjojen tarpeita. Muut siirrot käsittivät korkeintaan yhden pysäkkivälin muutoksen. Siirtoja tehtiin, koska katsottiin että



analyysissä löydetyn sijainnin välittömässä läheisyydessä oli rakentamisen kannalta parempia sijoituspaikkoja. Kokonaisuutena latausasemien siirroilla ei voida katsoa olevan merkittävää vaikutusta järjestelmän toimintaan latausvälien, latausaikojen, luotettavuuden, akustomitoituksen tai muiden olennaisten määreiden osalta.

## 5.2 Linja ja sijoituspaikkakohtainen tarkastelu

Seuraavaksi tarkastellaan yksityiskohtaisemmin edellisessä kappaleessa esiteltyihin lopullisiin sijainteihin (kuva 6) perustuvaa latausasemaverkostoa pysäkki ja linja kerrallaan. Tarkastelu aloitetaan yksittäisten linjojen näkökulmasta ja lopuksi tarkastellaan kaikkia linjoja osana koko järjestelmää. Ominaisuuksia verrataan teoriaan pohjautuviin raja-arvoihin ja selvitetään miten hyvin tai huonosti koko verkosto ja sen yksittäiset osat mahdollistavat bussiliikenteen sähköistämisen.

Lopullinen verkosto käsittää yhteensä kahdeksan latauspistettä viiden linjan alueella. Linjojen pysäkit ja latausvälit on koottu taulukoihin 5 ja 6. Taulukossa 5 on esitetty kaikki potentiaaliset latauspisteet ja taulukossa 6 pakolliset latauspisteet. Jaottelu valinnaisiin ja pakollisiin latauspisteisiin tehtiin, koska kaikkia potentiaalisia latauspisteitä ei ole tarkoituksenmukaista käyttää kaikilla linjoilla. Latauspisteitä karsimalla latausvälin vaihtelua ja samalla myös lataustapahtumien määrä voitiin vähentää, jolloin linjaston kokonaislatausaikaa saadaan pienennettyä. Jaossa valinnaisiin ja pakollisiin kohteisiin latauspisteiden välinen maksimietäisyys asetettiin 15 kilometriin. Jos 15 kilometrin rajasta luovuttaisiin olisi pakolliset latausasemat mahdollista järjestää myös toisin.

Taulukko 5. Potentiaalisten latauspisteiden mukaiset latausvälit.

Linja	Pysäkki (nimi, suunta, karttanumero) (m)				
	8. Keskussairaala I	4. Keskusta I	6. Vesmanninmäki I	7. Vesmanninmäki L	5. Keskusta L
Linja 1	3344	7636	9850 / 10490	7612	12677
	1. Palokan TK P	8. Keskussairaala I	4. Keskusta I	5. Keskusta L	
Linja S1	9680	3344	11870	13118	
	4. Keskusta I	2. Kuokkala P	5. Keskusta L		
Linja 2	10251 / 10628	3403	6436		
	3. Seitikintie 3	8. Keskussairaala I	4. Keskusta I	1. Palokan TK P	5. Keskusta L
Linja 3	3332	3344	7950	13258	6750
	4. Keskusta I	5. Keskusta L	3. Seitikintie 3		
Linja 12	13709	8457	13213		

Taulukko 6. Pakollisten latauspisteiden mukaiset latausvälit.

Linja	Pysäkki (nimi, suunta, karttanumero) (m)			
	8. Keskussairaala I	6. Vesmanninmäki I	7. Vesmanninmäki L	5. Keskusta L
Linja 1	10980	9850 / 10490	7612	12677
	1. Palokan TK P	4. Keskusta I	5. Keskusta L	
Linja S1	13024	11870	13118	
	4. Keskusta I	2. Kuokkala P		
Linja 2	10251 / 10628	9839		
	3. Seitikintie 3	1. Palokan TK P	5. Keskusta L	
Linja 3	14626	13258	6750	
	4. Keskusta I	5. Keskusta L	3. Seitikintie 3	
Linja 12	13709	8457	13213	

Linjakohtaiset pakollisiin latauspisteisiin perustuvat kokonais-, pysäkki- ja telakoitumisajat on koottu taulukkoon 7. Taulukossa on esitetty pelkän energialatauksen vaatima kokonaisaika, latauspistekohtainen aika sekä telakoitumisen sisältävä kokonais- ja latauspistekohtainen aika. Keskiarvoinen pysähdysaika laskettiin linjapituuden ja tarvittavien latauspisteiden lukumäärän perusteella. Yksittäiset lataustapahtumat vaihtelivat välillä 1min 13sek ja 1min 31sek.

Tarkastelussa käytetään oletuksena tästä johdettua keskimääräistä latausaikaa: 1min 20sek. Linjakiertoon tarvittava energiamäärää voidaan pitää vakiona ja siten tarvittava latausaika on vakio, mutta latauslaitteeseen telakoituminen kasvattaa kokonaisaikaa jokaisella latauskerralla. Telakoitumiseen kuluva aika on arvioilta 30–60 sekuntia (D: Jyväskylän kaupunki 2019). Lataustapahtuman oletetuksi kokonaiskestoksi saadaan tällöin 2min 13sek – 2min 31sek.

*Taulukko 7. Linjakohtaiset latausajat.*

Nimi	Linjapituus A (m)	Linjapituus B (m)	Potentiaaliset lataussijainnit (kpl)	Kokonais- latausaika A	Kokonais- latausaika B	Per latauspiste	Per latauspiste + 60sek	Kokonaislatausaika (sis. 60sek)
Linja 1	20560	20880	4	04:56	05:01	01:15	02:15	09:00
Linja S1	19006		3	04:34		01:31	02:31	07:33
Linja 2	10045	10234	2	02:25	02:27	01:13	02:13	04:26
Linja 3	17317		3	04:09		01:23	02:23	07:09
Linja 12	17690		3	04:15		01:25	02:25	07:15

Saatuja latausaikoja verrattiin pysäkkikohtaisiin nousuaikoihin, jotka on kerätty marraskuussa 2019. Käytetyt nousuajat ja nousutiedot on kokonaisuudessaan kerätty liitteeseen 3. Alkuperäinen nousutietoaineisto pitää sisällään kaikki pysäkiltä suoritettut nousut, jotka on jaoteltu päivän sekä tunnin mukaan. Alkuperäistä aineistoa on muokattu siten, että arkipäiviltä MA-PE ja erikseen päivältä LA on laskettu tuntimääräiset keskiarvot, jotka on edelleen jaettu neljällä, jolloin lopputuloksena on 15 minuuttia vastaavat nousijamäärät. Jaon tarkoituksena on kuvata realistisemmin yksittäisen pysähdysten nousijamääriä. Nousutietojen avulla on kuitenkin haastavaa ennustaa luotettavasti uusien linjojen käyttöä ja tutkimuksessa päädyttiin vertaamaan laskennallisia latausaikoja alueen kaikkiin samansuuntaista liikennettä palveleviin pysäkkeihin. Esimerkiksi analyysin Linja 1 pysäkin 5. Keskusta L laskennallista latausaikaa verrattiin nykyisistä pysäkeistä Keskusta 5, 6 ja 7 nousuaikoihin.

Sijoituspaikkojen ympäristöjä tarkastellaan yleisellä tasolla huomioiden esimerkiksi ympäristön nykyinen rakennuskanta ja sen aiheuttamat haasteet. Tutkimuksessa ei oteta kantaa latausasemien sijainteihin esimerkiksi rakennus- tai kaavoitusteknisistä näkökulmista. Sähkötekniset näkökulmat huomioidaan puhtaasti Alvan edustajan kommenttien perusteelta, joita saatiin alkuperäisen aineiston (11.10.2019) pohjalta luotujen skenaarioiden latausasemasijainteja koskien. Kommenteista on otettu huomioon yleiset muuntamoiden rakentamista, ominaisuuksia ja liitettävyyttä sivuavat kommentit sekä pysäkkikohtaiset kommentit niiltä osin kuin pysäkit ovat pysyneet samoina (Ks. Liite 1; Liite 2; Kuva 6).

### 5.2.1 Linja 1

Linjan 1 linjapituus on noin 20 kilometriä, riippuen ajetaanko reittiä A vai B. Linjan laskennallinen kokonaislatausaika on siten 4min 56sek – 5min 1sek kulutuksen ollessa 1,2kWh/km ja lataustehon 600kW. Linjan varrella on viisi potentiaalista lataussijaintia: 8. Keskussairaala I, 4. Keskusta I, 6. Vesmanninmäki I, 7. Vesmanninmäki L ja 5. Keskusta L. Lyhin etäisyys latausasemien välillä on hieman yli 3 kilometriä ja pisin hieman alle 13 kilometriä. Potentiaalisista latauspisteistä on voitu tiputtaa pois 4. Keskusta I – alue, jolloin pienin latausväli on noussut noin 3 kilometristä 7,6 kilometriin. Keskustan idän liikennettä syöttävän latauspisteen karsiminen pois linjan 1 latauspisteistä auttaa myös alentamaan keskustan pisteen oletuksena korkeaa käyttöastetta ja siten tasaamaan lataustapahtumia pysäkkien välillä.

Linjaston latausasemissa 8. Keskussairaala I ja 5. Keskusta L alueilla on nousijamäärien perusteella parhaat mahdollisuudet saada sovitettua lataustapahtuma normaalin pysähtymisen yhteyteen. Vertaamalla yksittäisten pysäkkien nousijamääriä yksittäisen lataustapahtuman teoreettiseen keston saadaan selville, että busseja olisi mahdollista ladata nykyisistä pysäkeistä normaalin pysähtymisen yhteydessä arkisin keskussairaala 1 kello 15:00–16:00, keskusta 6 kello 14:00–18:00 ja keskusta 7 kello 14:00–17:00. Muina aikoina pysäkkien nousijamäärät eivät yksin riitä koko latausajan peittämiseen, mutta auttavat kuitenkin vähentämään tarpeetonta pysäkillä odottamista. Keskustan pysäkeillä latausta voidaan suorittaa myös kuljettajan vaihtojen yhteydessä.

Vesmanninmäen latauspisteet sijaitsevat Vaajakosken keskustassa ja tässä skenaariossa ne syöttävät vain linjan 1 liikennettä. Ne kuitenkin sijaitsevat kaiken Vaajakosken suuntaan tapahtuvan liikenteen näkökulmasta hyvin keskeisellä paikalla ja siten latausasemia on mahdollista hyödyntää tulevaisuuden linjoilla. Nousijamäärät ovat molemmilla pysäkeillä liian alhaiset, jotta nousutapahtuman yhteydessä ehdittäisiin suorittaa koko lataustapahtuma.

### 5.2.2 Linja 2

Linja 2 on aineiston lyhin linja ja sen pituus vaihtelee päätepysäkin mukaan 10 kilometristä 10,2 kilometriin. Linjan laskennallinen kokonaislatausaika aika 2min 25sek – 2min 27sek. Linjan varrella on kolme potentiaalista latauspistettä: 4. Keskusta I, 5. Keskusta L ja 2. Kuokkala P.

Linjaston lyhin latausväli kaikkien potentiaalisten latauspisteiden kesken on noin 3 kilometriä ja pisin hieman yli 10 kilometriä. Lyhyen linjapituuden takia latausasemista voidaan karsia pois 5. Keskusta L, jolloin molemmat jäljelle jäävät latausvälit ovat noin 10 kilometriä. Lataustapahtuma on mahdollista suorittaa normaalin pysähtymisen yhteydessä keskustan alueen nykyisillä pysäkeillä 3 ja 4 arkipäivinä kello 13:00-17:00 välisenä aikana. Keskustan pysäkeillä suoritetaan myös kuljettajanvaihtoja, joiden aikana busseja on mahdollista ladata. Kuokkalan pysäkillä nousijamäärät eivät ole lataustapahtuman suorittamiseen riittävän suuria. Pisimmät pysähtymiset ajoittuvat arkipäiväisin ja ovat pituudeltaan noin 40–50 sekuntia.

### 5.2.3 Linja 3

Linja 3 on pituudeltaan noin 17 kilometriä ja laskennallinen kokonaislatausaika on 4 minuuttia 9 sekuntia. Linjan varrella on viisi potentiaalista latausasemaa: 3. Seitikintie 3, 8. Keskussairaala L, 4. Keskusta I, 1. Palokan TK P ja 5. Keskusta. Etäisyydet vaihtelevat kolmesta kilometristä hieman yli 13 kilometriin. Karsimalla pois 4. Keskusta I ja 8. Keskussairaala L latauspisteet taulukon 3 mukaisesti vaihtelee latausetäisyys jäljelle jäävien latausasemien kesken noin 7–15 kilometrin välillä. Nousijamäärien perusteella oletetuista latausasemasijainneista vain 5. Keskusta L -alueen nykyisillä pysäkeillä on mahdollista sovittaa lataustapahtuma normaalin pysähtymisen yhteyteen. Keskusta 6 -pysäkillä tämä on mahdollista arkisin kello 14:00-18:00 välisenä aikana ja Keskusta 7 -pysäkillä kello 14:00-17:00 välisenä aikana. 3. Seitikintie 3 -pysäkillä ei ole varsinaista liikennöintiä, vaan sen on linjan 3 päätepysäkki. Siten pysäkin nousijamäärät ovat hyvin minimaaliset, mutta päätepysäkeillä suoritettavan aikataulun tasauksen voidaan olettaa riittävän 2min 20sek kestävään lataukseen ja todennäköisesti lataustapahtuma voi olla tarvittaessa pidempikin. Vastaavasti linjan viimeinen latauspiste 1. Palokan TK P -pysäkillä on normaali reitin varrella oleva piste, jossa ei pysähdytä matkustajien nousun tai laskun vaatimaa aikaa pidemmäksi. Pysäkin nousijamäärät mahdollistavat maksimissaan 15 sekunnin pysähdyksen, joka ei riitä lataukseen.

#### 5.2.4 Linja S1

Linja S1 on pituudeltaan noin 19 kilometriä ja linjan laskennallinen kokonaislatausaika on 4 minuuttia ja 34 sekuntia. Linjan varrella on neljä potentiaalista latausasemaa: 1. Palokan TK P, 8. Keskussairaala I, 4. Keskusta I ja 5. Keskusta L. Näiden lyhin keskinäinen etäisyys on noin kolme kilometriä ja pisin noin 13 kilometriä. Pakollisia latausasemia linjalla on kolme, kun valinnainen 8. Keskussairaala L jätetään pois. Pakollisten latausasemien välinen etäisyys on pienimmillään noin 12 kilometriä ja pisimmillään noin 13 kilometriä. Pakollisista latausasemista vain 4. Keskusta I ja 5. Keskussairaala L -alueilla on lataustapahtuman järjestämiseksi riittävän suuret nousijamäärät. 1. Palokan TK P -pysäkki on linjan päätepysäkki, joten pienestä nousijamäärästä huolimatta aikataulun tasauksen yhteydessä on riittävästi aikaa ladata akustoa.

#### 5.2.5 Linja 12

Linjan 12 pituus on noin 18 kilometriä, jonka perusteella laskennallinen kokonaislatausaika on 4 minuuttia 16 sekuntia. Linjan varrella on kolme potentiaalista latausasemaa: 4. Keskusta I, 5. Keskusta L ja 3. Seitikintie 3. Latausasemien määrää ei ole mahdollista vähentää, vaan nämä ovat myös linjan toiminnan kannalta pakolliset latauspisteet. Niiden välinen lyhin etäisyys on 8,5 kilometriä ja pisin noin 14 kilometriä. Keskustan alueella lataustarpeeseen voidaan osittain vastata normaalien pysähtymisien yhteydessä johtuen suurista nousijamääristä sekä kuljettajan vaihdoista. 3. Seitikintie 3 -pysäkillä lataustapahtuma on järjestettävä osana linjan normaalia aikataulua, sillä nousijamäärät ovat pysäkillä hyvin pienet, eikä se ole linjan päätepysäkki.

#### 5.2.6 Sijoituspaikkakohtainen tarkastelu

Latausasemien sijoittelua on tähän mennessä arvioitu järjestelmän kokonaisuuden ja yksittäisten linjojen näkökulmasta ja seuraavaksi käydään vielä läpi sijoituspaikkakohtainen näkökulma. Tässä oleellisia tekijöitä ovat yksittäisten latauspisteiden käyttöaste ja latauspisteen ympäristö. Käyttöaste ja siten pysäkin latausikkuna on laskettu linjojen oletetun vuorovälin perusteella (Taulukko 8). Latausikkunalla tarkoitetaan suurinta teoreettista latausaikaa, kun pysäkin liikenne porrastetaan täydellisesti. S1 linjalla vuoroväli on 10min ja muille linjoilla 15min.

Ympäristötekijöitä on pyritty miettimään käytännön toteutuksen kautta perustuen oletukseen, että kauemmaksi keskeisistä sijainneista tulevia latausasemia voidaan pitää lähtökohtaisesti helpommin toteutettavina. Latauspaikat käydään läpi helpoimmista haastavimpiin.

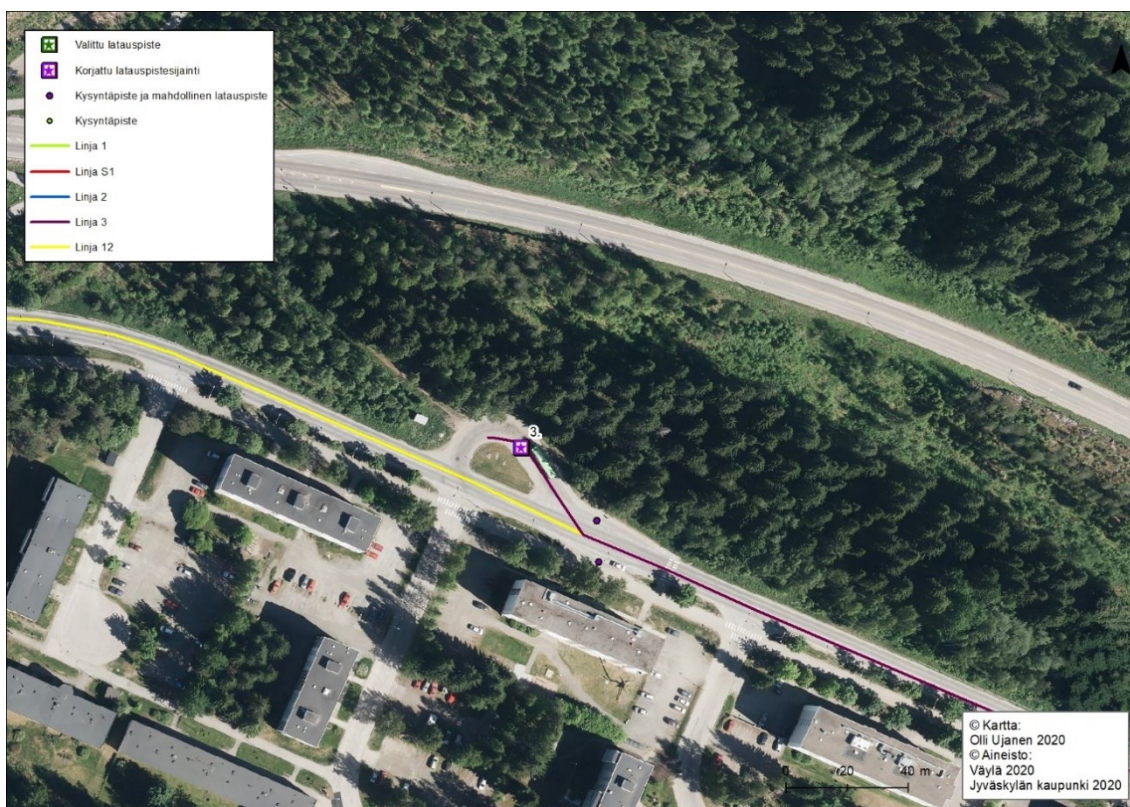
Taulukko 8. Potentiaaliset ja pakolliset pysäkit.

Nimi	Pysäkki (karttanumero, nimi, suunta, latausikkuna)							
	1. Palokan terveyskeskus P (6min 40sek)	2. Kuokkala 1 (15min)	3. Seitikintie 3 (7min 30sek)	4. Keskusta I (4min 37sek)	5. Keskusta L (3min 31sek)	6. Vesmanninmäki (15min)	7. Vesmanninmäki L (15min)	8. Keskussairaala L (15min)
Linja 1				Potentiaallinen	Pakollinen	Pakollinen	Pakollinen	Pakollinen
Linja S1	Pakollinen			Pakollinen	Pakollinen			Potentiaallinen
Linja 2		Pakollinen		Pakollinen	Potentiaallinen			
Linja 3	Pakollinen		Pakollinen	Potentiaallinen	Pakollinen			Potentiaallinen
Linja 12			Pakollinen	Pakollinen	Pakollinen			

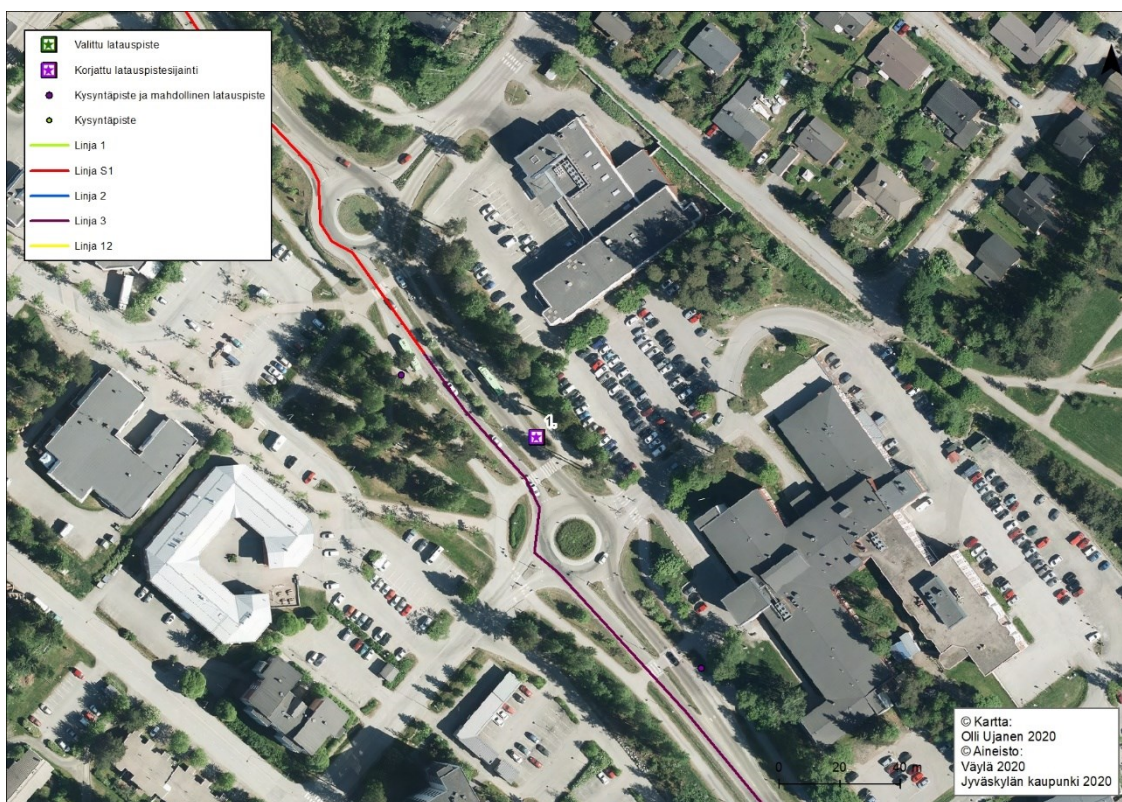
Seitikintien pysäkki (Kuva 7) on selkeästi kaikista latauspisteistä helpoiten toteutettavissa. Se sijaitsee tiestä erillisellä tilavalla kääntöalueella ja sen vieressä kulkee 20kV:n kaapeli, johon latausaseman muuntamo voidaan liittää. Seitikintie käyttöaste uusilla runkolinjoilla on 8 bussia tunnissa, joka tarkoittaa maksimissaan 7min 30sek latausikkunaa per pysähdys.

Palokan teveyskeskuksen pysäkin (Kuva 8) käyttöaste on 10 bussia tunnissa ja latausikkuna 6min 40sek. Muuntamon sijoittaminen Palokan kohteen ympäristöön on Seitikintietä haastavampaa, mutta pysäkin läheisyydessä on parkkipaikkoja sekä viheralueita, joilla sijoitus voisi olla mahdollista. Palokan kohde Elenian sähköverkon alueella eikä Alvan edustaja voinut kommentoida paikallisen runkoverkon sijaintia tai ominaisuuksia. Läheisen terveyskeskuksen takia voidaan kuitenkin olettaa, että kohteen runkoverkko on riittävä latausaseman sijoittamiselle.





Kuva 7. Seitinkientien pysäkin ympäristö.



Kuva 8. Palokan pysäkin ympäristö.



2. Kuokkala 1, 6. Vesmanninmäki I, 7. Vesmanninmäki ja 8. Keskussairaala I latausasemat on sijoitettu keskeisille sijainneille, mutta sijainneistaan huolimatta niiden ympäristöissä on vähintään kohtuulliset mahdollisuudet latausinfrastruktuurin sijoittamiselle. Ehdotetuista runkolinjoista Kuokkalan pysäkin (Kuva 9) ohi kulkee vain linja 2, mutta nykyisen etelänsuuntaisen liikenteen kannalta Kuokkalan sijainti on hyvin keskeinen. Latausaika pysäkillä ehdotettujen runkolinjojen perusteella maksimissaan 15 minuuttia. Latausaseman sijoittamisesta haasteellisen tekee pysäkin itäpuolella oleva kallioseinä. Muuntamo jouduttaisiin todennäköisesti sijoittamaan seinän takia tien läntiselle puolelle. Tien suuntaisesti kulkee 20 kV:n kaapeli, joten muuntamon liittäminen runkoverkkoon ei ole ongelma.

Vesmanninmäen pysäkit (Kuva 10) syöttävät runkolinjoista vain yhtä, mutta ovat Vaajakosken liikenteen kannalta hyvin keskeisillä paikoilla. Latausaika pysäkillä on siten suurimmillaan sama kuin Kuokkalassa eli 15min. Vaajakosken latausasemien ympäristössä on kohtuullisesti tilaa muuntamon sijoittamiselle. Kohde sijaitsee Elenian sähköverkon alueella.



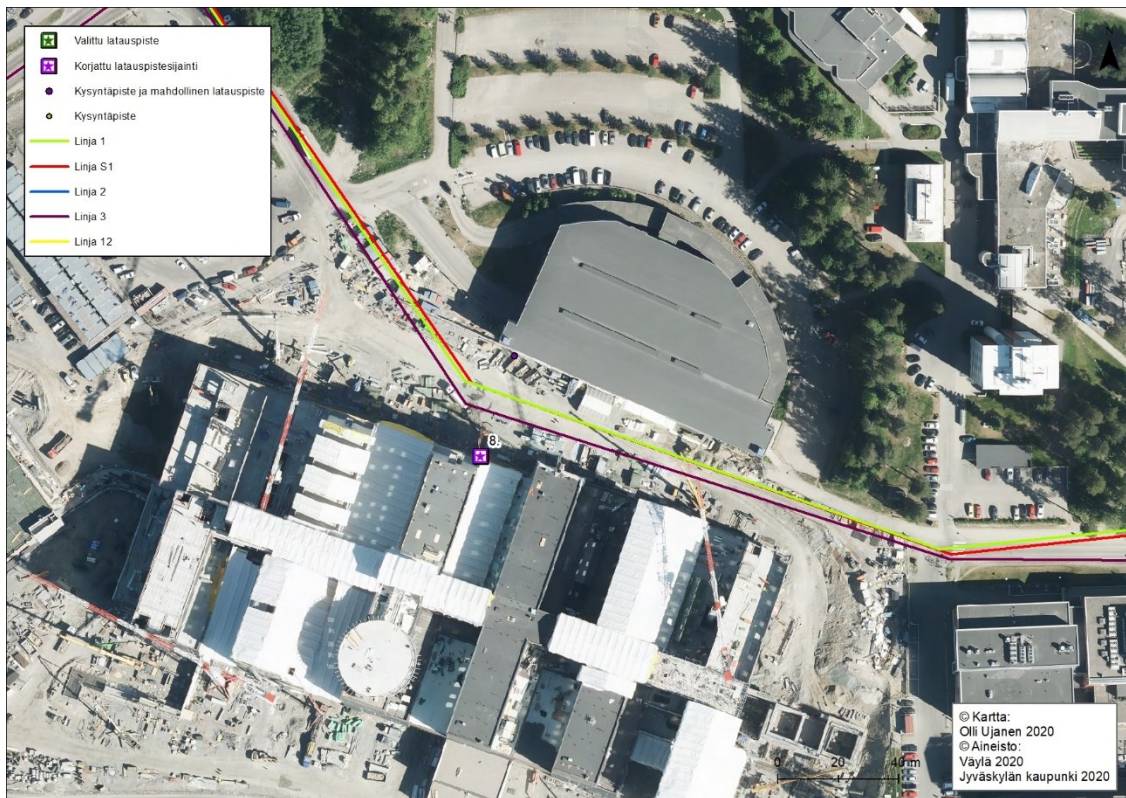
Kuva 9. Kuokkalan pysäkin ympäristö.



Kuva 10. Vesmanninmäen pysäkkien ympäristö.

Keskussairaalan latausasema on suunniteltu sijoitettavaksi Hoitajantielle sairaalan pääoven läheisyyteen (Kuva 11). Hoitajantien käyttö tulee ajankohtaiseksi sairaalan remontin valmistuttua ja aikaisemmat linjat kulkivat Hoitajantien sijaan keskussairaalan kautta. Ohi kulkisivat linjat 1, S1 ja 3, joista vain linjaa 1 on suunniteltu ladattavan pysäkillä. Kaikkien kolmen linjan lataaminen tarkoittaisi noin 4min 20sek maksimi latausaikaa per pysähdys. Pelkkää linjan 1 kalustoa ladattaessa maksimi latausaika olisi 15min. Keskussairaalan pysäkki ei ollut aikaisemmissa skenaarioissa mukana, joten muuntamon sijoittelua ja liitettävyyttä tulee selvittää Alvan kanssa.



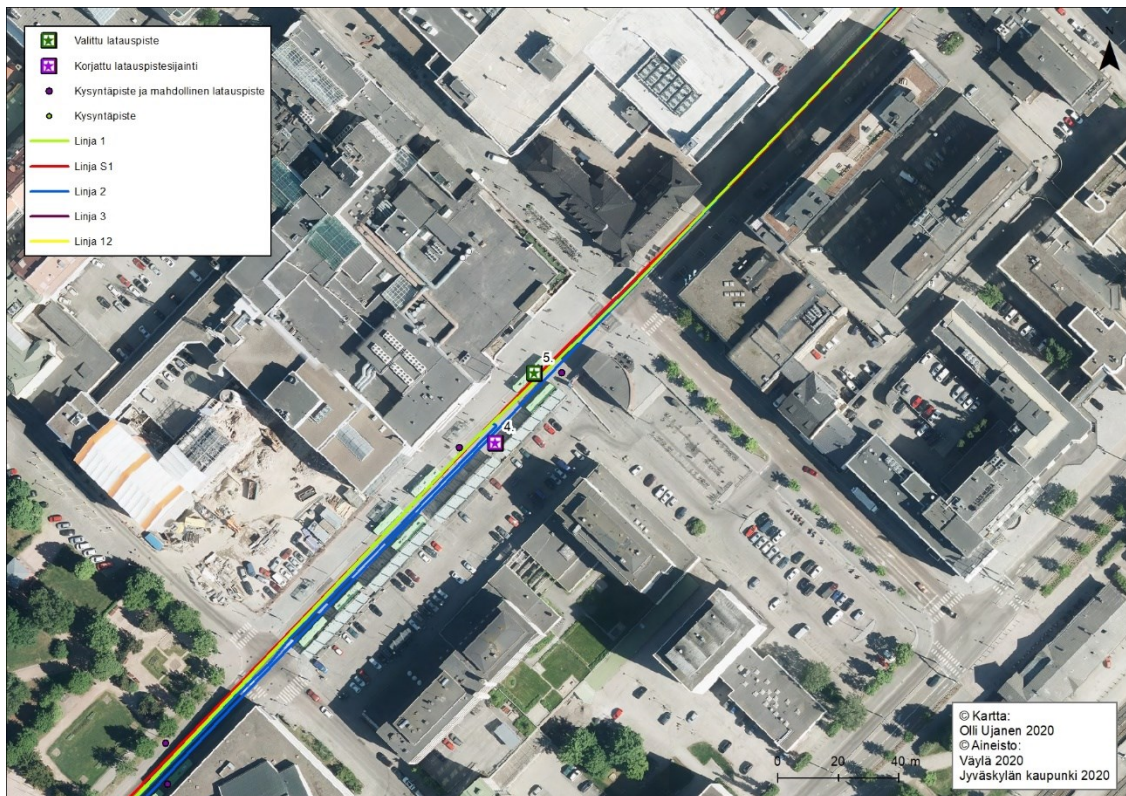


Kuva 11. Keskussairaalan pysäkin ympäristö.

Haastavimmat sijoituspaikat ovat keskustan Vapaudenkadulla. 4. Keskusta I ja 5. Keskusta L - latausasemat, jotka sijaitsevat bussikadulla (Kuva 12). Kadulla liikennöinti on sallittua vain joukkoliikenteen kalustolla. Katu on noin 100 metriä pitkä ja sen varrella on pysäkkejä molemmin puolin. Bussikatu on Jyväskylän joukkoliikenteen keskipiste ja kaikki aineiston linjat kulkevat sen läpi. Myös suurin osa nykyisistä linjoista kulkee katua pitkin, joten keskustan pysäkeillä on erityisesti varauduttava mahdolliseen latausasemien ruuhkautumiseen. Skenaarion linjoista S1, 2 ja 12 käyttävät oletuksena 4. Keskusta I latauspistettä, joten lataukseen jää aikaa maksimissaan 4min 20sek per pysähdys. 5. Keskusta L käyttävät linja 1, S1, 3 ja 12, joten länteen päin kulkevan liikenteen lataukseen jää aikaa maksimissaan 3min 20sek. Keskustan pysäkeillä tarvittaisiin todennäköisesti kaksi latauslaitetta kumpaankin suuntaan, jolloin latausikkuna tuplaantuisi. Teoriassa latausaika on riittävä yksittäisilläkin latauspisteillä, mutta käytännössä se vaatisi linjojen aikataulujen täydellistä porrastamista ja pienikin poikkeama voisi ruuhkauttaa laitteiston.

Ympäristön ahtaus tekee useamman latausaseman sijoittamisesta haasteellista, sillä ne vievät tilaa katua käyttäviltä polttomoottoribusseilta, joiden liikennöinnille on myös

varmistettava riittävät tilat. Keskustan ahtaus tekee myös muuntamoiden ja latausinfrastruktuurin rakentamisesta vaikeaa. Bussikadun eteläpuolella on L-mallinen pysäköintialue, jolle tilan puolesta muuntamo olisi mahdollista sijoittaa. Keskusta alueen kaupunkikuvaan ei kuitenkaan välttämättä sovi muuntamorakennus. Muuntamo olisi myös todennäköisesti kooltaan muita latausasemia suurempi, sillä sen tulisi kyetä syöttämään samanaikaisesti neljää 600kW pikalaturia. Vaihtoehdot muuntamon sijoittaminen piiloon esimerkiksi läheisen rakennuksen sisätiloihin tulisi selvittää.



Kuva 12. Keskustan pysäkkien ympäristö.

### 5.3 Bussiverkoston simulointi

Simuloinnin tarkoituksena on saada tarkempi kuva analyysin pohjalta luodun bussiverkoston toiminnasta. Simulaatioita toistettiin valituilla arvoilla kymmenesti ja tulosten perusteella laskettiin muuttujakeskiarvot. Saadut tulokset on taulukoitu liitteisiin 4–6. Taulukoissa on ilmoitettu simulaatiossa käytetyt arvot, kuten latausaika ja kulutus. Ilmoitettu latausaika pitää aina sisällään 60 sekunnin telakoitumisen. Taulukon vasemmassa reunassa ilmoitettu ”x. pois” kuvaa ohitettavan pysäkin sijaintia linjalla. Esimerkiksi 0. pois tarkoittaa linjan ensimmäisen

pysäkin ohittamista, 1. pois linjan toisen pysäkin ohittamista ja niin edelleen. Ohitettava pysäkki siis vaihtelee linjakohtaisesti. ”Kaikki latausasemat” tarkoittaa, että kaikissa pisteissä suoritetaan lataus. Käydään seuraavaksi saadut tulokset läpi.

Ensimmäiseksi simuloitiin kulutuksen vaihtelun vaikutusta akustokokoihin poistamalla latausaikarajoite. Huomattiin, että kaikki linjat toimivat poikkeusoloissakin 60kWh akustoilla aina 1,3kWh/km kulutukseen saakka, sekä linjat 1 ja 2 aina 1,5kWh/km kulutukseen asti. Normaalioloissa 1,2 kWh/km operoitaessa bussit tarvitsivat vähintään 30kWh:n akuston ja linjalla 2 pärjättäisiin jopa 20kWh:n akustoilla. 1,5kW/km kulutuksella akuston minimikoko kasvoi normaalitilanteessa 40kWh:iin (Liite 4).

Seuraavaksi otettiin huomioon myös latausaika. Latausaika huomioiden analyysin pohjalta saatu verkosto ei toiminut kaikkien linjojen osalta oletuslatausajalla 140sek (Ks. Taulukko 4) edes normaaliolosuhteissa, vaan latausaikaa piti kasvattaa 150 sekuntiin ja poikkeustilanteessa edelleen 160 sekuntiin. Linjojen välillä oli latausajan riittävyyden suhteen runsasta vaihtelua. Linjoille 1 ja 2 oletuslatausaika 140 sekuntia oli riittävä kaikissa tilanteissa, mutta linja S1 vaati 160 sekunnin latausajan akustokoon pitämiseksi alle 60kWh. Tuloksista myös huomataan, että latausaikoja ei ole mielekästä kompensoida akustokokoja kasvattamalla, sillä 10 sekunnin säästö latausajassa tarkoittaa simulaation perusteella 30-70kWh suurempia akustoja (Liite 5). Kun lataustehoa laskettiin 600kW oletuksesta 400kW:tiin nousi tarvittava latausaika keskimäärin 40 sekuntia. Kaikkien linjojen sähköistys vaatisi siis 400kW latureilla 170–200 sekunnin latausajan linjasta riippuen (Liite 6). Linjat 1 ja 2 olivat kaikilla lataustehoilla joustavimmat latausaikojen suhteen ja linja S1 jäykin.

Lataustehon vaikutusta latausaikoihin on kuvattu taulukoissa 9, 10 ja 11. Taulukossa 9 kuvataan linjakohtaista vaihtelua ja taulukoissa 10 sekä 11 pysäkkikohtaista vaihtelua käyttämällä 400kW ja 600kW latureita. Lataustehon pohjalta tehdyt simulaatiot poikkeavat edellisistä siinä, että siinä on sallittu latausajan pysäkkikohtainen vaihtelu. Taulukon 9 perusteella voidaan huomata, että latausajassa saatava hyöty sekunneissa pienenee merkittävästi, kun verrataan esimerkiksi hyppäystä välillä 200kW – 300kW ja 500kW – 600kW. Siten lataustehoa kasvattamalla ei välttämättä saada käytännön kannalta merkittävää parannusta latausaikoihin.



Taulukko 9. Lataustehon vaihtelun merkitys latausajalle linjoittain.

	Latausteho (kW), Latausaika (sek) (kulutus 1.2kW/km, akustokoko 60kWh)				
Linja	200kW	300kW	400kW	500kW	600kW
L1	270	200	165	145	130
L2	270	200	165	145	130
L3	295	215	180	160	140
L12	300	220	180	155	140
LS1	320	230	190	165	145

Pysäkkikohtaisen vaihtelun salliminen näkyy erityisesti linjoilla 1 ja 3, joissa 600kW latauksella pysäkkien välille tulee 50-60 sekunnin ero latausaikaan (Taulukko 10). Lataustehon laskiessa 400kW ero kasvaa Linjalla 3 jo 100 sekuntiin ja linjalla 1 eroa on Keskusta L ja Vesmanninmäki I välillä 90 sekuntia (Taulukko 11).

Taulukko 10. Pysäkkikohtaisen latausajan vaihtelu 600kW latausteholla.

	Pysäkki, Latausaika (sek) (kulutus 1.2kW/km, akustokoko 60kWh, latausteho 600kW)				
Pysäkki	Linja 1	Linja 2	Linja 3	Linja 12	Linja S1
Palokan TK P	-	-	140	-	150
Kuokkala P	-	130	-	-	-
Seitikintie 3	-	-	170	140	-
Keskusta I	-	130	-	160	130
Keskusta L	150	-	110	120	160
Vesmanninmäki L	130	-	-	-	-
Vesmanninmäki I	100	-	-	-	-
Keskussairaala I	140	-	-	-	-

Taulukko 11. Pysäkkikohtainen latausajan vaihtelu 400kW latauksella

	Pysäkki, Latausaika (sek) (kulutus 1.2kW/km, akustokoko 60kWh, latausteho 400kW)				
Pysäkki	Linja 1	Linja 2	Linja 3	Linja 12	Linja S1
Palokan TK P	-	-	180	-	200
Kuokkala P	-	160		-	-
Seitikintie 3	-	-	230	200	-
Keskusta I	-	170	-	210	170
Keskusta L	210	-	130	140	200
Vesmanninmäki L	160	-	-	-	-
Vesmanninmäki I	120	-	-	-	-
Keskussairaala I	170	-	-	-	-

Lopuksi simuloinnilla selvitettiin ylilatauksen määrää normaalioloissa. Ylilatauksen määrä tarkoittaa käytännössä sitä, kuinka paljon oletettua aikaisemmin pysäkiltä pystytään lähtemään. Ylilataus vaihteli 1,2kW/km kulutuksella 25 ja 8 sekunnin välillä ollen suurin linjalla 1 ja pienin linjalla S1. 1,4kWh/km kulutuksella ylilatauksen määräksi tuli linjalla S1 negatiivisia arvoja, jotka kertovat siitä, että akustoja ei kyetty enää keskimäärin lataamaan 90 prosenttiin pysähdysten yhteydessä. Linjat 1 ja 2 kestivät kulutuksen kasvua selkeästi muita paremmin, sillä niissä ylilataus pysyi positiivisena aina 1,6kWh/km lukemiin saakka (Taulukko 12).

Taulukko 12. Ylilatauksen määrä normaaliolosuhteissa.

	Kulutus (kWh/km), Ylilataus (sek), (akusto 60kwh, latausteho 600kW, latausaika 100sek)			
Linja	1,2kW/km	1,3 kW/km	1,4 kW/km	1,5 kW/km
L1	25	19	13	6
L2	26	21	14	8
L3	15	8	2	-
L12	15	9	1	-
LS1	8	2	-	-

## 6. Tulosten tarkastelu

Tutkimuksen tarkoituksena oli 1) löytää Jyväskylän runkolinjaehdotuksen mukaisesta joukkoliikenneverkosta latausasemien sijoituspaikoiksi sopivia kohteita ja 2) tutkia niiden pohjalta luodun bussiverkoston toimintaa eri tilanteissa laitteiston mitoituksien löytämiseksi. Sijoituskohteita etsittiin verkostosta keskeisiä sijainteja suosivaan teoreettiseen viitekehykseen perustuen. Keskeisiä sijainteja hyödyntämällä latausasemien käytöstä saadaan tehokasta ja siten kokokustannukset on mahdollista saada houkutteleviksi polttomoottorikäyttöisiin busseihin verrattuna. Sähköbussien ominaisuudet, ja linjoille, sekä latausasemapsäkeille annetut vaatimukset, antoivat perustan, jolle tutkimuksessa käytetyt menetelmät rakennettiin. Lokaatio-allokaatio analyysin avulla verkostosta pystyttiin löytämään useita latausasemille sopivia sijainteja, jotka teorian mukaisesti raja-arvoihin pohjautuen muodostivat toimivia verkostokokonaisuuksia. Manuaalisten korjausten jälkeen päädyttiin lopullisiin latausasemasijainteihin, joista kaksi sijaitsee linjan päätepisteissä ja kuusi linjojen keskellä (Kuva 6).

Lopulliset latausasemasijainnit sijaitsevat pisteissä, jotka mahdollistivat niiden tehokkaan käytön runkolinjaehdotuksen mukaisten linjavetojen sähköistämisessä. Valittujen sijaintien pohjalta on mahdollista sähköistää tulevaisuudessa myös uusia linjoja, koska on todennäköistä, että myös uudet linjat kulkevat valittujen pisteiden kautta. Uusia linjoja suunniteltaessa on kuitenkin otettava huomioon yksittäisten latauspisteiden käyttöaste ja selvitettävä riittääkö latauskapasiteetti uusille linjoille. Keskustassa haasteita synnyttävät sekä latausvälin riittävyys, että lataukseen tarvittava tila. Keskustassa olisi selvitettävä mahdollisuus päällekkäiselle lataukselle, joka luonnollisesti tarvitsee yksittäistä latauspistettä enemmän tilaa. Keskustan latauspisteiden keskeinen sijainti ja korkeat nousijamäärät nousevat myös keskustan suurimmiksi vahvuuksiksi. Keskusta on Jyväskylän bussijärjestelmän napa ja siten sitä voidaan käyttää joustavasti eri linjojen sähköistämiseen. Teoriassa keskustan nousijamäärät myös tarjoavat riittävän latausajan ainakin iltapäivän ja alkuillan tunteina. Muualla sijaitsevien latausasemien osalta, päätepysäkit pois luettuina, lataustapahtuma tulisi ottaa erikseen huomioon aikatauluja suunniteltaessa. Keskimääräinen tarvittava pysähdysaika lataustapahtumalle oli analyysin perusteella 140 sekuntia.

Syntynyttä bussiverkostoa simuloimalla huomattiin, että analyysin pohjalta lasketut oletusarvot eivät latausajan osalta (140sek) riittäneet takaamaan kaikkien verkoston



linjojen toimintaa. Tämä johtui oletusarvojen laskentatavasta, joka perustui kaikkien linjojen pohjalta laskettuihin keskiarvoihin. Lataustarpeessa on linjojen kesken merkittävää vaihtelua, jolloin saatu keskiarvo oli liian kaukana pisimpien latausvälien linjojen tarpeista. Simulaation perusteella todellinen latausaika vaihteli 600kW latauksella 140–170 sekunnin välillä linjasta riippuen.

Pelkästään yksittäiseen pysähdykseen käytettävä latausaika ei kerro koko totuutta, sillä myös kokonaislatausaika on linjakierron aikataulutuksen kannalta hyvin oleellinen. Yksittäisiä latausaikoja tutkittaessa linja 1 ja 2 ovat hyvin samankaltaisia, mutta kokonaislatausaika linjalla 2 on puolet pienempi. Tämä johtuu linjan 2 lyhyemmästä linjapituudesta, joka vaatii vain kahden latauspisteen käytön. Verrattaessa lähes saman linjapituuden omaavia linjoja 1 ja S1 keskenään huomataan, että yksi ylimääräinen latauspiste linjan 1 varrella pienentää tarvetta yksittäiselle lataukselle merkittävästi. Vastaavasti linjan 1 kokonaislatausaika on ylimääräisen pysähdyksen takia pidempi kuin linjalla S1. Latausaikakeskustelussa merkittävää on myös se mihin latausaika sijoittuu ja miten se näkyy liikenteen järjestäjälle sekä käyttäjälle. Kokonaislatausaikaa voitaisiin kompensoida ylimääräisillä autoilla tai vastaavasti lataustapahtumat voisi pyrkiä sovittamaan reitin varrelle siten, että suosituimpien matkojen aikana, esimerkiksi Keltinmäeltä keskustaan, bussia ladattaisiin mahdollisimman harvoin.

Simulaation perusteella myös muissa kuin latausajoissa ja linjapituuksissa oli havaittavissa selkeää verkoston sisäistä vaihtelua. Vaihtelu linjojen välillä ei välttämättä ole huono asia, sillä se mahdollistaa linjakohtaisen optimoinnin. Kuitenkin tässä tutkielmassa yksi lähtöoletuksista oli, että kaikella hankittavalla kalustolla olisi kyettävä liikennöimään kaikilla linjoilla. Lopullisessa suunnittelutyössä olisi kuitenkin järkevää tehdä linjojen suhteen ryhmittelyä ja mitoittaa kalustot saatujen ryhmien mukaisesti. Silloin olisi mahdollisuus sekä kevyeen optimointiin, että tarvittaessa kaluston kierrättämiseen saman ryhmän linjojen välillä. Esimerkiksi tutkielman linjoista 1 ja 2, sekä 3, 12 ja S1 olisivat ominaisuuksiensa puolesta jaettavissa omiksi ryhmikseen.

Linjojen välisen vaihtelun lisäksi simulaatiolla saatiin vaihtelua myös linjojen sisälle pysäkkikohtaisiin latausajoihin. Linjojen sisäinen vaihtelu on tässä tapauksessa suunnittelun kannalta linjojen välistä vaihtelua haasteellisempaa. Sisäisellä vaihtelulla voi olla vaikutusta laitteiston käyttöikään ja luotettavuuteen. Teorian perusteella suuret latauksen

vaihtelut lisäävät akuston kulumista ja laskevat käyttöikää (Erkkilä ym. 2019). Latausajan epätasaisen jakautumisen seurauksena pysäkkien merkitys verkostossa vaihtelee, jolloin latauslaitteiston rikkoutumisella on erilainen merkitys riippuen sen asemasta verkostossa. Simulaatiossa esimerkiksi linjan 3 latauspisteistä Seitikintie 3 vastasi 43 prosentista kokonaislatauksesta (Taulukko 11). Kyseisen latausaseman rikkoutuessa kaikki lataus on allokoitava muille pysäkeille ja tätä muutosta voi olla erittäin haastavaa huomioida linjojen aikataulutuksessa. Toisaalta taas pysäkkikohtainen latausajan allokointi tarjoaa mahdollisuuden pysäkkien ”luonnollisen” latausajan tehokkaaseen hyödyntämiseen esimerkiksi suorittamalla suurin osa latauksesta linjan päätepysäkillä ja lataamalla vähemmän esimerkiksi keskustan ruuhkaisissa latauspisteissä. Samanlaista linja- ja pysäkkikohtaista optimointia olisi mahdollista tehdä latausajan lisäksi myös latauslaitteiston suhteen, vaikka tässä tutkielmassa sitä ei tehty.

## 7. Pohdinta

Kokonaisuutena sähköbussiverkoston suunnitteluun liittyy hyvin useita huomioitavia muuttujia, kuten eri lataustekniset vaihtoehdot, akustojen mitoitus, akustojen ominaisuuksien tunteminen, energian kulutuksen vaihtelun mittaaminen topografian ja ilmaston mukaan, ratkaisujen taloudelliset kustannukset, asiakastyytyvyydestä ja luotettavuudesta huolehtiminen, maankäytön ja kaavoituksen kysymykset, kaupunkikuvan muutos ja toimijoiden uudet roolijaot (ks. A: Sclar 2017). Pitkä lista ei ole tokikaan ole täydellinen, mutta kuvastaa monipuolisen lähestymistavan tärkeyttä kokonaisvaltaiseen ratkaisuun pyrittäessä. Tässä tutkimuksessa kokonaisongelmaan, eli sähköbussiverkoston suunnitteluun, haettiin vastausta hyvin tarkasta keskeisiin pikalatauspisteisiin perustuvasta näkökulmasta. Ratkaisua haettiin jakamalla valittu näkökulma edelleen pienempiin osioihin (analyysi ja simulointi), jotka käytiin läpi yksi kerrallaan ja saatujen tulosten perusteella muodostettiin kokonaiskuva tilanteesta. Osissa tehtävä tutkimus on ketterää ja se mahdollisti tässä tapauksessa esimerkiksi aineiston vaihtamisen kesken tutkimuksen.

Tutkielmassa käytetyissä menetelmissä on kuitenkin useita kehittymismahdollisuuksia. Analyysivaiheessa todenmukaisempaan bussiverkoston kuvaamiseen päästäisiin käyttämällä lokaatio-allokaatio analyysin sijaan flow capturing location allocation (FCLM) lähestymistapaa. Siinä kysyntää mallinnetaan Origin-Destination pareilla, jolloin

pisteiden sijaan kysyntä ilmenee verkoston kaarissa. Tämä on realistisempi kuvaus läpi kulkevan liikenteen aiheuttamasta kysynnästä. Verkosto koostuu mallissa käytännössä virtauksen määrästä ja reitistä (Hodgon 1990). FCLM on kuitenkin perinteistä lokaatio-allokaatio analyysia monimutkaisempi toteuttaa muun muassa siksi, ettei ArcMap -ohjelmistosta löydy työkaluja sen käyttöön. Simulaation osalta selkeä kehitysaskel olisi bussien liikkumisen realistinen mallinnus verkostossa, jolloin aikatauluihin pohjautuen pystyttäisiin paremmin selvittämään latausasemien yhteiskäyttöön liittyviä riskejä. Lisäksi simulaatiossa voitaisiin realistisemmin huomioida latauslaitteen ja bussin kulutuksen vaihtelu. Koko prosessia olisi mahdollista jatkokehittää nykyisestä myös yhdistämällä analyysi ja simulaatiovaiheet yhdeksi kaikenkattavaksi malliksi.

Tutkielman tuloksissa keskeinen huomio kiinnittyy jo teoriassa mainittuun tapaan lähestyä verkostoa kokonaisuutena. Se antaa mahdollisuuden suunnitella verkostosta muunneltava ja pitkäikäinen. Lähestymistapana sitä voidaan hyödyntää keskeisten pikalatauspisteiden ohella myös varikkolatauksen tai yhdistelmälatauksen suunnittelussa. Toinen keskeinen huomio on linja- ja pysäkkikohtaisen optimoinnin mahdollisuus ja siihen liittyvät riskit. Pitkälle vietyä optimointi voi monimutkaistaa suunnittelua tarpeettoman paljon, mutta jo tässä tutkielmassa tehdyllä kevyellä optimoinnilla voitaisiin saavuttaa merkittävää hyötyä. Optimointi on tehokkainta juuri keskeisten sijaintien tapauksessa eikä samanlaista hyötyä voida saavuttaa esimerkiksi varikkolatausta hyödyntävässä järjestelmässä. Varikkolatauksessa on kuitenkin omat selkeät vahvuutensa, joten sähköistämisessä tulisi alustavasti pyrkiä huomioimaan useampia järjestämistapoja, kuten pika-, varikko- ja yhdistelmälataus. Ei tule myöskään unohtaa tutkimuksen pohjimmaista tarkoitusta, joka on tuottaa tietoa puhtaamman ja vähäpäästöisemmän liikennöinnin tueksi. Suurta kokonaisuutta tarkasteltaessa suunnittelutyö on vain ketjun alkuosa, jonka jälkimmäisiä lenkkejä, kuten jälkimarkkinoiden ja kierrätyksen mahdollistamista voidaan pitää vähintään yhtä tärkeinä lopullisen päämäärän, eli puhtaan ja ekologisen liikenteen kannalta.

## LÄHTEET

- ABB. (2020). Pantograph down for electric buses. <<https://new.abb.com/ev-charging/products/pantograph-down>>. 7.5.2020.
- Ahearn, S. (2008). Object Orientation. Teoksessa Kemp, K. (toim.): *Encyclopedia of Geographic Information Science*, 323-326. Sage Publications.
- Bannon, E. (2020). Electric car sales sky-rocket in Europe, 6.2.2020. <<https://www.transportenvironment.org/news/electric-car-sales-sky-rocket-europe>>. 17.5.2020
- Bian, L. (2007). Object-Oriented Representation of Environmental Phenomena: Is Everything Best Represented as an Object? *Annals of the Association of American Geographers* 97:2, 267-281.
- Bian, L. (2017). Data model, object oriented. Teoksessa Richardson, D., N. Castree, M. F. Goodchild, A. L. Kobayashi, W. Loi & R. A. Marston (toim.): *The international Encyclopedia of Geography: People, the Earth, Environment and Technology*. John Wiley & Sons, Chichester.
- Church, R. & C. ReVelle (1974). The maximal covering location problem. *Papers of the Regional Science Association* 32, 101-118.
- Church, R. (2008). Location-Allocation Modeling. Teoksessa Kemp, K. (toim.): *Encyclopedia of Geographic Information Science*, 264-267. Sage Publications.
- Cooper, L. (1963). Location-allocation problems. *Operations Research* 11, 331-343.
- Cruz-Zambrano, M., C. Corchero, L. Igualada-Gonzalez & V. Bernando. (2013). Optimal location of fast charging stations in Barcelona: A Flow-Capturing approach. *International Conference on the European Energy Market (IEEE)*. Stockholm, Sweden, 1-6.
- Curtin, K. M. (2017). Network analysis. Teoksessa Richardson, D., N. Castree, M. F. Goodchild, A. L. Kobayashi, W. Loi & R. A. Marston (toim.): *The international Encyclopedia of Geography: People, the Earth, Environment and Technology*. John Wiley & Sons, Chichester.
- Curtin, K. M. (2008). Network analysis. Teoksessa Kemp, K. K. (toim.): *Encyclopedia of Geographic Information Science*, 310-313. Sage Publications.
- Dueker, K. J., T. J. Kimpel & G. Strathman. (2004). Determinants of Bus Dwell Time. *Journal of Public Transportation* 7:1, 21-40.
- Egenhofer, M. & A. Frank. (1992). Object-Oriented Modeling for GIS. *URISA Journal* 4:2, 3-19.
- Ercan, T., Y. Zhao, O. Tamari & J. A. Pazour (2015). Optimization of transit bus fleet's life cycle assessment impacts with alternative fuel options. *Energy* 93, 323-334.
- Erkkilä, V., A. Hentunen & P. Sainio (2019). Energy storage technologies (eStorage). Teoksessa Pihlatie, M. & J. Pippuri-Mäkeläinen (toim.): *Electric Commercial Vehicles (ECV) : Final report*, 14-20. VTT Technology 348, VTT.
- A: Esri (2020). Types of network analysis layers. <<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/extensions/network-analyst/types-of-network-analyses.html>>. 17.5.2020

- B: Esri (2020). What is a shapefile? <<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/manage-data/shapefiles/what-is-a-shapefile.htm>>. 20.4.2020.
- Eudy, L. & M. Jeffers (2017). *Foothill Transit Battery Electric Bus Demonstration Results: Second Report*. National renewable Energy Laboratory, Denver.
- EUVL (2019). *Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2019/1161 puhtaiden ja energiatehokkaiden tieliikenteen moottoriajoneuvojen edistämiseksi annetun direktiivin 2009/33/EY muuttamiseksi*.
- FCH-JU (2012). *Urban Buses: Alternative Powertrains for Europe. The Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking*.
- Franca, A., J. Alberto, C. Crawford & N. Djilali (2017). Assessing the impact of an electric bus duty cycle on battery pack life span. *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC) Chicago IL*, 679-683.
- García-Palomares, J., Gutiérrez, J. & M. Latorre (2012). Optimizing the location of stations in bike-sharing programs: A GIS approach. *Applied Geography* 35, 235-246.
- GTFS Static overview (2020). Google. <<https://developers.google.com/transit/gtfs>>. 20.4.2020.
- Hakimi, S. (1965). Optimum distribution of switching centers in a communication network and some related graph theoretic problems. *Operations Research* 13:3, 462-475.
- Halmeaho, T., J. Laurikko, A-P. Pellikka, S. Kallonen & M. Pihlatie (2019). Electric city bus demonstration environment – results from laboratory tests on commercial buses. *Teoksessa Pihlatie, M. & J. Pippuri-Mäkeläinen (toim.): Electric Commercial Vehicles (ECV) : Final report*, 95-104. VTT Technology 348, VTT.
- Halmeaho, T. & J. Laurikko (2019). Electric bus technologies (eBus). *Teoksessa Pihlatie, M. & J. Pippuri-Mäkeläinen (toim.): Electric Commercial Vehicles (ECV) : Final report*, 21-28. VTT Technology 348, VTT.
- Hodgon, M., J. (1990). A Flow-Capturing Location-Allocation Model. *Geographical Analysis* 22:3, 270-279.
- A: Jyväskylän kaupunki (2019). Linkki tulevaisuuteen 2030 – Jyväskylän seudun joukkoliikenteen kehittämisohjelma. 34 s.  
<[https://linkki.jyvaskyla.fi/sites/default/files/atoms/files/linkki\\_tulevaisuuteen\\_2030.pdf](https://linkki.jyvaskyla.fi/sites/default/files/atoms/files/linkki_tulevaisuuteen_2030.pdf)>. 17.5.2020
- B: Jyväskylän kaupunki (2019). Kaupunkistrategia 2017–2021.  
<<https://www.jyvaskyla.fi/talousarviot/talousarvio-2019/kaupunkistrategia-2019>>. 17.5.2020
- C: Jyväskylän kaupunki (2019). Resurssiviisas Jyväskylä -ohjelma 2040. 46 s.  
<[https://www.jyvaskyla.fi/sites/default/files/atoms/files/resurssiviisas\\_jyvaskyla\\_ohjelma\\_2040\\_toimenpiteineen.pdf](https://www.jyvaskyla.fi/sites/default/files/atoms/files/resurssiviisas_jyvaskyla_ohjelma_2040_toimenpiteineen.pdf)>. 17.5.2020
- D: Jyväskylän kaupunki (2019). *Jyväskylän linja-autoliikenteen käyttövoimaselvitys – Raportti*. 51 s.
- Kuhne, R. (2010). Electric buses – An energy efficient urban transportation means. *Energy* 35, 4510-4513.
- Kunith, A. R. Mendelevitch & D. Goehlich (2014). Planning and optimization of a fast-charging infrastructure for electric bus systems. *International Conference of Traffic and Transport Engineering, Belgrade Serbia*.

- Kunith, A., R. Mendelevitch, A. Kuschmierz & D. Goehlich (2016). Optimization of fast charging infrastructure for electric bus transportation – Electrification of a city bus network. *EVS29 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium Montreal Canada*, 1-12.
- Kunith, A., R. Mendelevitch & D. Goehlich (2017). Electrification of a city bus network – An optimization model for cost-effective placing of charging infrastructure and battery sizing of fast-charging electric bus systems. *International Journal of Sustainable Transportation* 10:11, 707-720.
- Lajunen, A. (2014). Energy consumption and cost-benefit analysis of hybrid and electric city buses. *Transportation Research Part C* 38, 1-15.
- Lajunen, A. (2019). Lifecycle cost evaluation of electric bus operation. *Teoksessa Pihlatie, M. & J. Pippuri-Mäkeläinen (toim.): Electric Commercial Vehicles (ECV) : Final report*, 132-144. VTT Technology 348, VTT.
- Lajunen, A. & K. Tammi (2019) Evaluation of energy consumption and carbon dioxide emissions of electric city buses. *Teoksessa Pihlatie, M. & J. Pippuri-Mäkeläinen (toim.): Electric Commercial Vehicles (ECV) : Final report*, 104-120. VTT Technology 348, VTT.
- Laurikko, J., M. Pihlatie, N. Nylund, T. Halmeaho, S. Kukkonen, A. Lehtinen, V. Karvonen, R. Mäkinen & S. Ahtiainen (2015). Electric city bus and infrastructure demonstration environment in Espoo, Finland. *EVS28 International Electric Vehicle Symposium and Exhibition Kintex Korea*, 1-11.
- Lehtinen, A. & O. Kanerva (2017). Selvitys sähköbussien edistämiseksi suomalaisilla kaupunkiseuduilla. *Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 21/2017*. Liikennevirasto, Helsinki 2017.
- Lehtinen, A., L. Gruzdaitis & N. Frilander (2018). Jatkoselvitys sähköbussien edistämiseksi suomalaisilla kaupunkiseuduilla. *Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 23/2018*. Liikennevirasto, Helsinki 2018.
- Liikenne ja viestintäministeriö (2018). *Toimenpideohjelma hiilettömään liikenteeseen 2045 – Liikenteen ilmastopolitiikan työryhmän loppuraportti*. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 13/2018. 138 s.
- Mahmoud, M., R. Garnett, M. Ferguson & P. Kanaroglou (2016). Electric buses: A review of alternative powertrains. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 62, 673-684.
- Marianov, V. & D. Serra (1998). Probabilistic maximal covering location allocation models for congested systems. *Journal of Regional Science* 38:3, 401-424.
- Markkula, J. & O. Vilppo (2014). Tampereen bussiliikenteen sähköistäminen. Tampereen kaupunki, Tampere 2014.  
<[https://www.tampere.fi/tiedostot/t/WOCdNZVvf/bussiliikenteen\\_sahkoistaminen\\_tauustaselvitys.pdf](https://www.tampere.fi/tiedostot/t/WOCdNZVvf/bussiliikenteen_sahkoistaminen_tauustaselvitys.pdf)>  
30.12.2018
- Miller, H., J. & S.-L. Shaw (2001). *Geographic information systems for transportation*. 480 s. Oxford university press, New York.
- Murray, T. & D. Tong (2009). GIS and spatial analysis in the media. *Applied Geography* 29, 250-259.
- Murawski, L. & R. Church (2009). Improving accessibility to rural health services: the maximal covering network improvement problem. *Socio-Economic Planning Sciences* 43, 101-110.
- Muurinen, C. (2019). Ensimmäinen biokaasubussi aloitti liikennöinnin Jyväskylässä. 9.7.2019  
<<https://www.huhtasuo.fi/2019/07/ensimmainen-biokaasubussi-aloitti-liikennoinnin-jyvaskylassa/>>.  
17.5.2020

- Mäkinen, J. & D. Nap (2019). Fundamentals of eBus fast charging. *Teoksessa* Pihlatie, M. & J. Pippuri-Mäkeläinen (toim.): *Electric Commercial Vehicles (ECV) : Final report*, 121-127. VTT Technology 348, VTT.
- Ndiaye, F., Ndiaye, B. & I. Ly (2012). Application of the p-Median Problem in School Allocation. *American Journal of Operations Research* 2:2, 1-7.
- Niestadt, M. & A. Børnåvold (2019). *Electric road vehicles in the European Union – Trends, impacts and policies*. European Parliamentary Research Service, EU.
- Olsson, O., A. Grauers & S. Pettersson (2016). Method to analyze cost effectiveness of different electric bus systems. *EVS29 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium Montreal Canada*, 1-12
- Pihlatie, M., S. Kukkonen, T. Halmeaho, V. Karvonen & N.-O. Nylund (2014). Fully Electric City Buses – The Viable Option. *2014 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC)*, Florence, 1-8.
- Pihlatie, M., R. Pasonen, M. Ranta, L. Laurila, P., Järventausta & K. Kauhaniemi (2019). Vehicle systems, power grid and charging (eCharge). *Teoksessa* Pihlatie, M. & J. Pippuri-Mäkeläinen (toim.): *Electric Commercial Vehicles (ECV) : Final report*, 38-46. VTT Technology 348, VTT.
- Ranta, M., V. Karvonen, J. J. Potter, R. Pasonen, E. Pursiheimo, T. Halmeaho, P. Ponomarev & M. Pihlatie (2016). Method Including Power Grid Model and Route Simulation to Aid Planning and Operation of an Electric Bus Fleet. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2016 – Hangzhou, China*, 1-5.
- Ranta, M., M. Pihlatie, A-P. Pellikka, J. Laurikko, P. Rahkola & J. Anttila (2018). Analysis and comparison of energy efficiency of commercially available battery electric buses. *14th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2017 - Belfort, France*, 1-5.
- Riemann, R., D. Wang & F. Busch (2015). Optimal location of wireless charging facilities for electric vehicles: Flow-capturing location model with stochastic user equilibrium. *Transportation Research Part C Emerging Technologies*, 58, 1-12.
- Rodrigue, J.-P., C. Comtois, & B. Slack (2017). *The Geography of Transport Systems*. 440 s. Routledge, New York.
- Rogge, M., S. Wollny & D. U. Sauer (2015). Fast Charging Battery Buses for the Electrification of Urban Public Transport – A Feasibility study focusing on Charging Infrastructure and Energy Storage Requirements. *Energies* 8, 4587-4606.
- Rogge, M., E. Hurk, A. Larssen & D. U. Sauer (2018). Electric bus fleet size and mix problem with optimization of charging infrastructure. *Applied Energy* 211, 282-295.
- Schietzelt, T. & P. Densham (2003). Location-allocation in GIS. *Teoksessa* Longley P. & M. Batty (toim.): *Advanced Spatial Analysis*. ESRI Press, New York.
- A: Sclar, R., C. Gorguinpour, S. Castellanos & X. Li (2019). Barriers to adopting electric buses. 54 s. World Resources Institute, Washington DC.
- B: Sclar, R., C. Gorguinpour, S. Castellanos & X. Li (2019). How to Enable Electric Bus Adoption in Cities Worldwide: A Guiding Report for City Transit Agencies and Bus Operation Entities. 68 s. World Resources Institute, Washington DC.
- Scott, A. (1970). Location-Allocation Systems: A Review. *Geographical Analysis* 2:2, 95-119.

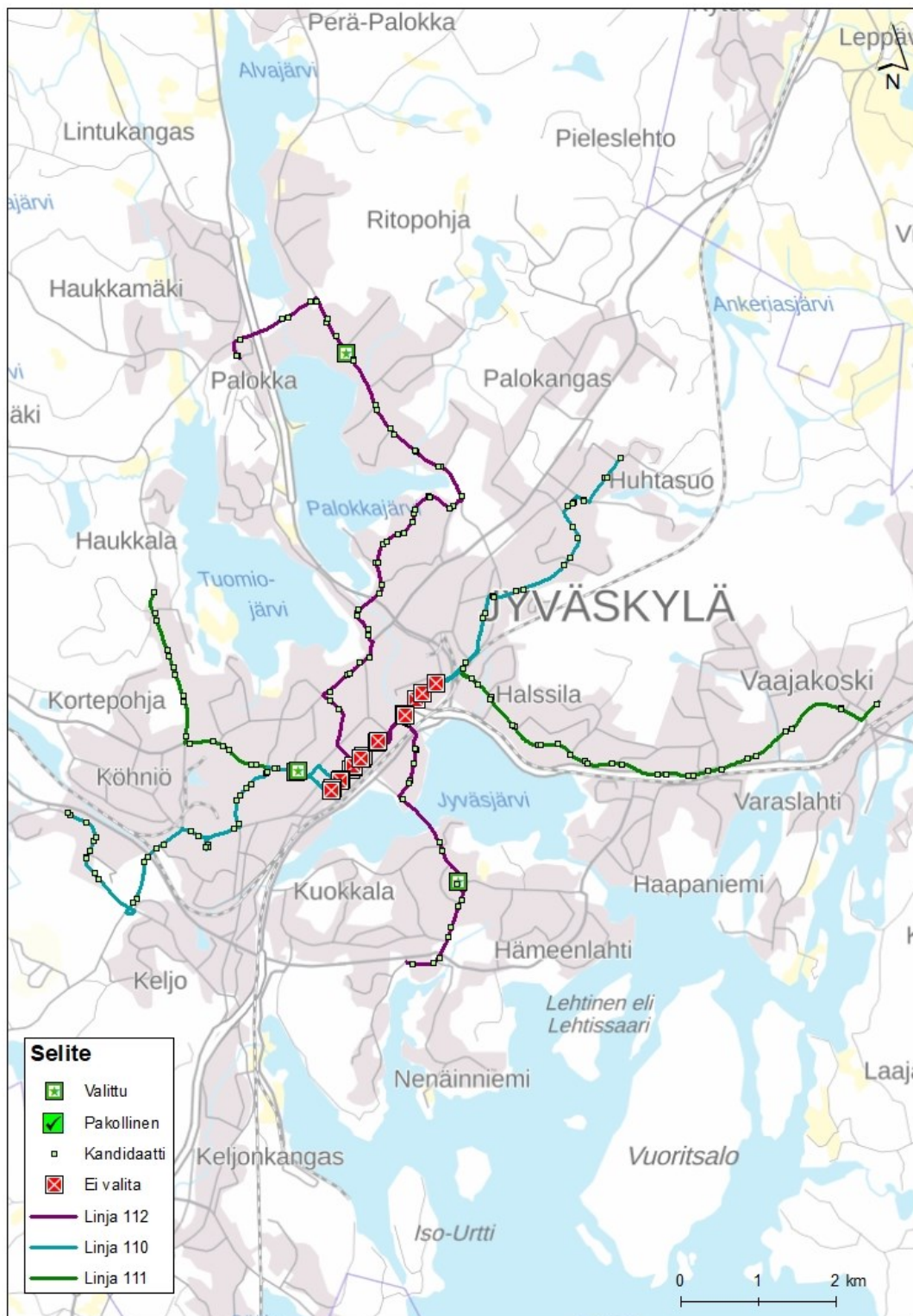
- Siemens. (2020). The SICHARGE UC family.  
<<https://new.siemens.com/global/en/markets/transportation-logistics/electromobility/ebus-charging/sicharge-uc.html>>. 7.5.2020
- Snyder, L. (2011). Covering problems. *Teoksessa* Eiselt, H. & V. Marianov (toim.): *Foundations of Location Analysis*. Springer, US.
- Suzuki, A. & Z. Drezner (1996). The p-center location problem in an area. *Location Science* 4:1-2, 69-82.
- Tanaka, K-I. & T. Furuta (2017). Location-Allocation Analysis. *Teoksessa* Richardson, D., N. Castree, M. F. Goodchild, A. L. Kobayashi, W. Liu & R. A. Marston (toim.): *The International Encyclopedia of Geography: People, the Earth, Environment and Technology*. John Wiley & Sons, Chichester.
- Trafi (2020). Ajoneuvokannan tilastot. < <https://www.traficom.fi/fi/tilastot/ajoneuvokannan-tilastot>>. 17.5.2020
- Työ- ja elinkeinoministeriö, Energiavirasto & Kuntaliitto (2016). Kunta-alan energiatehokkuussopimus. <<https://energiatehokkuussopimukset2017-2025.fi/sopimus/>>. 17.5.2020
- Työ- ja elinkeinoministeriö (2017). *Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030*. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisu 4/2017. 121 s.
- Vilppo, O. & J. Markkula (2015). Feasibility of electric buses in public transport. *EVS28 International Electric Vehicle Symposium and Exhibition Kintex Korea*, 1-9.
- Vilppo, O. & J. Markkula (2019). Feasibility of electric buses in public transport. *Teoksessa* Pihlatie, M. & J. Pippuri-Mäkeläinen (toim.): *Electric Commercial Vehicles (ECV): Final report*, 128-132. VTT technology 348, VTT.
- Väylä (2020). Digiroad – kansallinen tie- ja katuverkon tietojärjestelmä. <<https://vayla.fi/avoindata/digiroad>>. 20.4.2020.
- ZeEUS eBus Report #2 (2018). An updated overview of electric buses in Europe. <<https://zeeus.eu/uploads/publications/documents/zeeus-ebus-report-2.pdf>> 18.12.2019.
- Zhou, B., Y. Wu, B. Zhou, R. Wang, W. Ke, S. Zhang & J. Hao (2016). Real-world performance of battery electric buses and their life-cycle benefits with respect to energy consumption and carbon dioxide emissions. *Energy* 96, 603-613.
- A: Xylia, M., S. Leduc, P. Patrizio, F. Kraxner & S. Silveira (2017). Developing a dynamic optimization model for electric bus charging infrastructure. *Transportation Research Procedia* 27, 776-783.
- B: Xylia, M., S. Leduc, P. Patrizio, F. Kraxner & S. Silveira (2017). Locating charging infrastructure for electric buses in Stockholm. *Transport Research Part C* 78, 183-200.



## LIITTEET

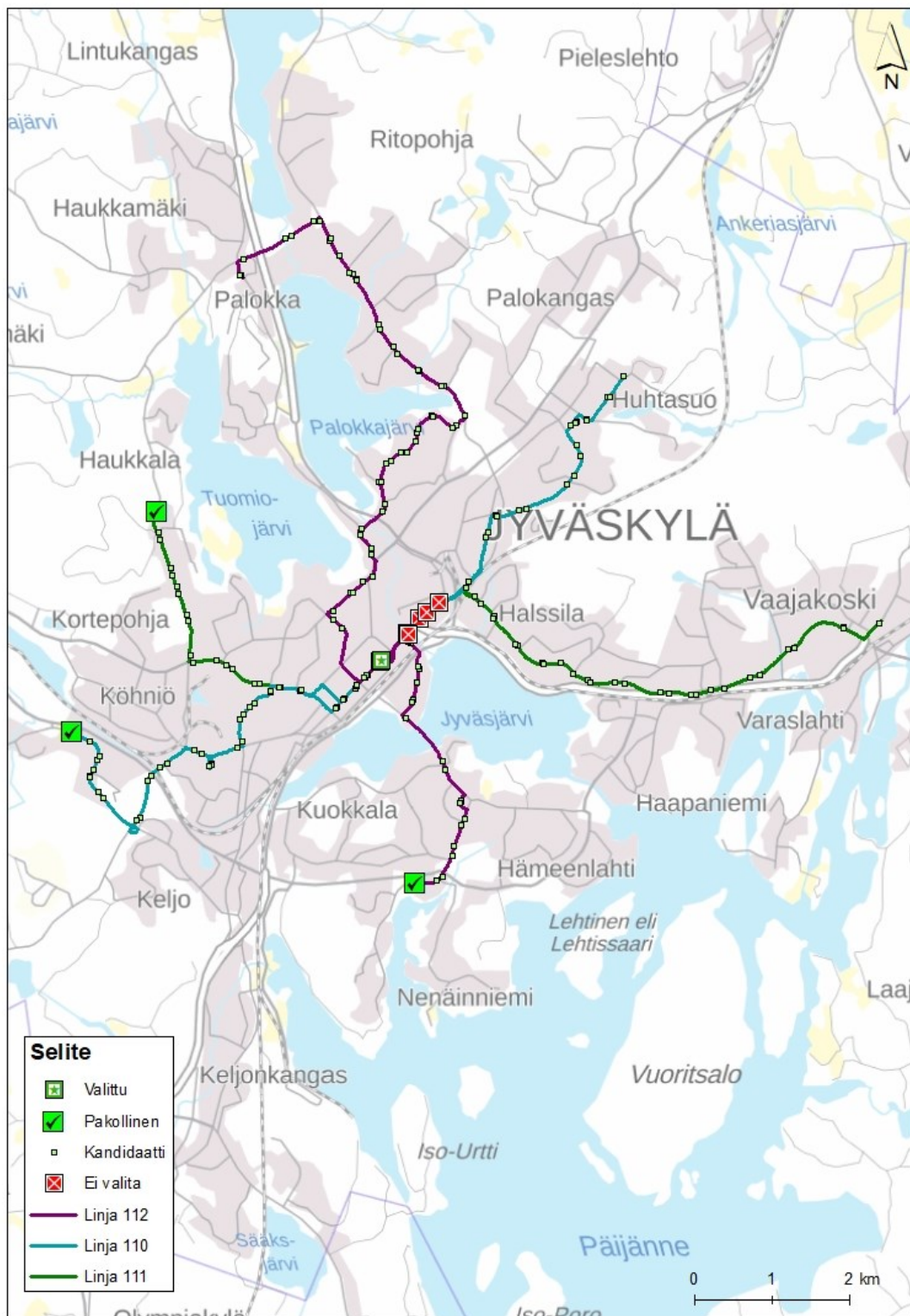
Liite 1. Alkuperäisen aineiston (19.11.2019) mukaiset skenaariokartat 1–4











## Liite 2. Alvan edustajan kommentit

### Sähköbussien latausasemien liittäminen Alva Sähköverkko Oy: n (ASV) jakeluverkkoon

Tässä selvityksessä on kuvattu, miten eri skenaarioissa esitetyt sähköbussien latausasemat voidaan liittää ASV: n sähköverkkoon. Skenaarioissa oli esitetty latausasemia myös Palokkaan Saarijärventielle, Vaajakoskelle Leppävedentielle sekä Ritopohjantielle. Kaikki nuo kohteet ovat Elenia Sähköverkon alueella, joten ko. latauspisteiden liittämisestä sähköverkkoon ei tässä selvityksessä ole mainintaa.

Perusajatuksena latauspisteiden liittämisessä on se, että kukin latauspiste liitetään omalla muuntamolla 20 kV: n verkkoon. Omalla muuntamolla varmistetaan paremmin jännitteen laatu standardin EN 50160 toteutumista sähköbussin latauksen aikana. Esitettyjen tehojen päälle- ja irti kytkeytyminen aiheuttaa jakelujännitteessä muutoksia, joita voi näkyä alueiden muilla kuluttajilla haitallisena valojen vilkkumisena ym. jännitteen laatuvirheenä. Latausaseman liittäminen muuntamon kautta 20 kV: n verkkoon estää joidenkin jännitteen laatuvirheiden siirtymisen muille kuluttajille.

Samalla latausasemien liittäminen omiin muuntamoihin helpottaa latausasemien tehojen kasvattamista myöhemmin sekä paikallisen latausaseman laajentamista mahdollisilla lisä latauspaikoilla.

Esitetyt latausasemien tehot 200-, 400- tai 600 kW ovat siksi suuria, että ne vaativat 0,4 kV: n liittymiskaapeloinneissa useamman kaapelin. Kun latausasemat liitetään omaan muuntamoon, eivät niiden liittymiskaapeloinnit estä alueen muiden liittymien kehittämistä mahdollisilla lisäkaapeloinneilla, jos ne kytkettäisiin alueen normaalin sähkön syötön muuntamoon. Vaikka esitetyt latausasemien paikat sijaitsevat valmiiden asuin- ym. alueilla, kasvaa niidenkin eri kiinteistöjen tehot / liittymät koko ajan. Esim. henkilö sähköautojen latauspisteet tulevat lisääntymään tulevaisuudessa, ja ne kasvattavat normaalien jakelumuuntamoihin liitettävien kaapeleiden lukumäärää.

**Jos latausaseman teho voidaan pitää pienenä esim. alle 50 kW, voidaan se liittää myös suoraan ASV: n 0,4 kV: n verkkoon.**

Oma erillinen muuntamo latausasemalle on kallis ratkaisu, kustannus n. 60–80 k€ / muuntamo. Mutta se helpottaa kuitenkin tulevaisuudessa latausaseman kehitystä, eikä silloin enää aiheuta suuriakaan lisäkustannuksia.

Muuntamo voidaan rakentaa ns. asiakasmuuntamona, jolloin sen kustannuksista vastaa liittyjä – tässä tapauksessa kaupunki, tai ASV: n jakelumuuntamona. Jos muuntamo on asiakasmuuntamo, vastaa liittyjä muuntamon rakentamisen kustannuksista ja maksaa sen lisäksi ASV: lle kj- liittymän liittymismaksun, joka määräytyy muuntamoon asennettavan jakelumuuntajan nimellistehon mukaisesti. Jos muuntamo rakennetaan ASV: n jakelumuuntamona, vastaa ASV sen rakentamisesta ja liittyjä ostaa siihen tehon mukaisen pj- liittymän.

Useamman vuoden kokonaiskustannuksia laskettaessa asiakkaan omistama muuntamo ja kj- liittämä voi tulla edullisemmaksi kuin pj- liittymä. Ero syntyy halvemmasta siirtomaksusta kj- siirron puolella.

Liittymien toteutus tulee miettiä ennen latausasemien rakentamisen päättämistä.

#### Latausasemien kohdekohtaiset toteutukset

##### Kangaslammen latausasema – Vääräjärventie

- Vääräjärventiellä on 20 kV: n kaapeli, johon latausaseman muuntamo voidaan liittää
- muuntamo sijoitetaan nykyisten bussien kääntöpaikan viereen Kulottajantien laitaan, toiselle puolelle katua ja latauspistettä

##### Keltinmäentien latausasema – Keltinmäentie

- Keltinmäentiellä on 20 kV: n kaapeli, johon latausaseman muuntamo voidaan liittää
- latausaseman muuntamo voidaan rakentaa aivan latauspisteen viereen

##### Laajavuorentien latausasema – Laajavuorentie

- Laajavuorentiellä on 20 kV: n kaapeli, johon latausaseman muuntamo voidaan liittää

##### Pohjanlahdentien latausasema – Pohjanlahdentie

- Pohjanlahdentiellä on 20 kV: n kaapeli, johon latausaseman muuntamo voidaan liittää
- muuntamo voidaan sijoittaa Pohjanlahdentien kevytväylän laitaan n. 20 m: n etäisyydelle latausasemasta

##### Rajakadun latausasema – Rajakatu

- latausaseman sijoitus tulee ottaa huomioon Rajakadun katusuunnitelmassa, kadusta on tehty saneeraussuunnitelma, mutta siinä olisi otettava latausasema paremmin huomioon
- Rajakadulla on 20 kV: n kaapeli, johon latausaseman muuntamo voidaan liittää

##### Syöttäjänkadun latausasema – Syöttäjänkatu

- Syöttäjän kadulla sijaitsee 20 kV: n kaapeli, johon latausaseman muuntamo voidaan liittää
- muuntamon sijoitusta on tarkasteltava kohteessa tarkkaan, koska latausaseman ympäristö on rakennettu valmiiksi, mahdollisesti muuntamo joudutaan sijoittamaan kauemman latauspisteestä

##### Vapaudenkadun latausasema – Vapaudenkatu / Urhonkatu

- latausaseman vaatiman muuntamon sijoitus tarkasteltava asemakaavallisena ratkaisuna ja mahdollisesti muuntamo joudutaan sijoittamaan kauemmas latausasemasta

-

##### Voionmaankadun latausasema – Voionmaankatu

- latausaseman vaatiman muuntamo voidaan sijoittaa Voionmaankadun laidassa olevalle puistoalueelle, n. 20 m: n päähän latauspistettä

### Liite 3. Noutsutiedot

[illegible]

Liite 4. Kulutuksen vaikutus akustoon

		Kulutus (kWh/km), Akusto (kWh) (latausteho 600kW, latausaika 300sek)			
	Linja	1,2kWh/km	1,3kWh/km	1,4kWh/km	1,5kWh/km
Kaikki lataus- asemat	L1	25	30	30	30
	L2	20	25	25	25
	L3	30	35	35	40
	L12	30	30	35	35
	LS1	30	30	35	35
0. pois	L1	50	50	55	60
	L2	40	45	50	50
	L3	45	45	50	55
	L12	55	60	65	70
	LS1	55	60	65	70
1. pois	L1	45	50	50	55
	L2	40	45	50	50
	L3	60	60	65	70
	L12	45	50	55	55
	LS1	50	55	60	65
2. pois	L1	35	40	45	45
	L2	-	-	-	-
	L3	40	45	50	50
	L12	45	50	50	55
	LS1	50	55	60	65
3. pois	L1	40	45	50	50
	L2	-	-	-	-
	L3	-	-	-	-
	L12	-	-	-	-
	LS1	-	-	-	-



Liite 5. Latausajan vaikutus akustoon (600kW latauslaitteisto)

		Latausaika (sek), Akusto (kWh) (kulutus 1.2kW/km, latausteho 600kW)				
	Linja	170 sek	160 sek	150 sek	140 sek	130 sek
Kaikki lataus- asemat	L1	25	25	25	30	55
	L2	20	20	20	25	45
	L3	30	30	35	50	125
	L12	30	30	30	50	120
	LS1	30	30	40	95	160
0. pois	L1	50	50	50	50	80
	L2	40	40	40	40	60
	L3	45	45	45	55	120
	L12	55	55	55	75	135
	LS1	55	55	65	105	150
1. pois	L1	45	45	45	45	75
	L2	40	40	40	40	65
	L3	60	60	60	75	145
	L12	45	45	45	70	140
	LS1	50	50	65	110	175
2. pois	L1	35	35	35	35	75
	L2	-	-	-	-	-
	L3	40	40	40	60	115
	L12	45	45	45	70	125
	LS1	50	50	60	110	170
3. pois	L1	40	40	40	40	70
	L2	-	-	-	-	-
	L3	-	-	-	-	-
	L12	-	-	-	-	-
	LS1	-	-	-	-	-

Liite 6. Latausajan vaikutus akustoon (400kW latauslaitteisto)

		Latausaika (sek), Akusto (kWh) (kulutus 1.2kW/km, latausteho 400kW)							
	Linja	200 sek	190 sek	180 sek	170 sek	160 sek	150 sek	140 sek	130 sek
Kaikki lataus- asemat	L1	25	25	25	35	80	135	190	240
	L2	20	20	20	30	75	130	180	235
	L3	35	35	55	95	145	190	240	290
	L12	30	35	60	100	145	190	240	285
	LS1	30	55	90	140	185	225	365	315
0. pois	L1	50	50	50	60	90	140	190	240
	L2	40	40	40	50	80	140	180	230
	L3	45	45	60	95	135	180	230	280
	L12	55	55	70	120	150	195	235	280
	LS1	55	70	110	140	180	215	255	300
1. pois	L1	45	45	45	55	95	140	190	240
	L2	40	40	40	50	90	145	195	245
	L3	60	60	80	125	165	210	255	300
	L12	45	45	70	115	160	210	250	300
	LS1	55	75	110	155	190	235	275	320
2. pois	L1	35	35	35	50	90	140	190	240
	L2	-	-	-	-	-	-	-	-
	L3	40	40	60	100	145	185	230	280
	L12	45	45	70	100	150	190	235	280
	LS1	55	70	110	150	190	230	275	320
3. pois	L1	40	40	40	50	90	140	190	245
	L2	-	-	-	-	-	-	-	-
	L3	-	-	-	-	-	-	-	-
	L12	-	-	-	-	-	-	-	-
	LS1	-	-	-	-	-	-	-	-

## Liite 7. Simulaation koodi

```
import random
import statistics

class Linja:
    """Sisältää linjan tiedot"""
    def __init__(self, nimi, pituus, pysakki_lista):
        self.nimi = nimi
        self.pituus = pituus
        self.pysakki_lista = pysakki_lista

    def palautanimi(self):
        return self.nimi

    def palautapituus(self):
        return self.pituus

    def tulosta(self):
        return 'LINJAN TIEDOT\n' + 'nimi: ' + self.nimi +
        'linjapituus: ' + str(self.pituus) + "\n"

class Pysakki:
    """Sisältää pysäkin tiedot"""
    def __init__(self, nimi, etaisyyss_seur, latausaik_kesk,
latausteh_kesk, lataus_tila):
        self.nimi = nimi
        self.etaisyyss_seur = etaisyyss_seur
        self.latausaika = latausaik_kesk
        self.latausteho = latausteh_kesk
        self.lataus_tila = lataus_tila

    def tulosta(self):
        return 'PYSÄKIN TIEDOT\n' + 'nimi: ' + self.nimi + 'etäisyys
seuraavalle latausasemalle: ' + \
        str(self.etaisyyss_seur) + 'latausteho: ' +
str(self.latausteho) + 'latausaika: ' + str(self.latausaika) \
        + 'latauksen tila: ' + str(self.lataus_tila) + '\n '

    def palautalatausteho(self):
        return self.latausteho

    def palautalatausaika(self):
        return self.latausaika

    def palautaetaisyyss(self):
        return self.etaisyyss_seur

    def palautanimi(self):
        return self.nimi

class Bussi:
    """Sisältää bussin tiedot"""
    def __init__(self, nimi, akustokoko, kulutus, akustovaraus,
linja):
```

```

        self.bussilinja = linja
        self.nimi = nimi
        self.akustokoko = akustokoko
        self.kulutus = kulutus
        self.akustovaraus = akustovaraus

    def palautabussilinja(self):
        return self.bussilinja

    def tulosta(self):
        return 'BUSSIN TIEDOT \n' + 'nimi: ' + self.nimi +
'\nakustokoko: ' + str(self.akustokoko) + '\nkulutus: ' + \
        str(self.kulutus) + '\nakustovaraus: ' +
        str(self.akustovaraus) + '\n'

def aja_bussia(sim_linja, matka):
    """Simuloidaan bussilinjat läpi yksi kerrallaan"""

    """luetaan linjojen, pysäkkien ja bussin tiedot muistiin"""
    linja, bussi = lue_muistiin(tiedostonimilinja[sim_linja],
tiedostonimipysakki[sim_linja], bussintiedot)

    """alustetaan muuttujat"""
    i = 0 # pysäkki ID
    ajettumatka = 0 # matka alkaa ja nollaantuu jokaisella pysäkillä
    kokonaiskulutus = 0
    kokonaismatka = 0
    kierros = 0 # montako kertaa linjanston pysäkit on kierretty
    ylilataus_pros = 0 # ylimääräinen latausta sekuntteina
    latauskerrat = 0 # montako kertaa bussia ladataan
    poten_latauspaikat = len(bussi.palautabussilinja().pysakki_lista)
    #potentiaaliset latauspaikat
    pak_latauspaikat = 0 #pakolliset latauspaikat

    """jaetaan ohitettavien latausasemien latausajat muille
pysäkeille"""
    jaet_lataus_aik = 0
    for a in range(poten_latauspaikat):
        if bussi.palautabussilinja().pysakki_lista[a].lataus_tila ==
1:
            pak_latauspaikat += 1
        if bussi.palautabussilinja().pysakki_lista[a].lataus_tila ==
0:
            jaet_lataus_aik +=
bussi.palautabussilinja().pysakki_lista[a].latausaika

    jaet_lataus_aik = jaet_lataus_aik / pak_latauspaikat

    for a in range(poten_latauspaikat):
        if bussi.palautabussilinja().pysakki_lista[a].lataus_tila ==
1:
            bussi.palautabussilinja().pysakki_lista[a].latausaika +=
jaet_lataus_aik

    """luodaan tulostiedostot jokaiselle linjalle ja kirjoitetaan
siihen muuttujien arvot alussa"""
    nimi = "%s_tulos.txt" % linja.palautanimi() # avataan tuloksia

```

```

varten uusi tiedosto (ylikirjoittaa edellisen tiedoston!!)
    f_tulos = open(nimi, "w")

    f_tulos.write('Muuttujat alussa: \n' + bussi.tulosta())

    for a in range(poten_latauspaikat):
        f_tulos.write("\n" + 'Pysäkin ID: ' + str(a) + '\n')
        f_tulos.write('Latausaika alussa: ' + str(
            bussi.palautabussilinja().pysakki_list[a].latausaika) +
'\n' + 'pysäkillä: ' + str(
            bussi.palautabussilinja().pysakki_list[a].nimi) +
'\n')

    """aloitetaan simulointi"""
    while kokonaismatka < matka:
        matkaajaljella =
float(bussipalautabussilinja().pysakki_list[i].palautaetaisyys()) /
1000

        # etäisyys seuraavaan latauspisteeseen ko. pysäkiltä

        while matkaajaljella != ajettumatka:

            if matkaajaljella - ajettumatka > 1: # liikutaan 1km
kerrallaan, jos matkaa jäljellä yli kilometri
                ajettumatka += 1
                kokonaismatka += 1
                kokonaiskulutus += bussi.kulutus
                bussi.akustovaraus = bussi.akustovaraus -
bussik.kulutus / bussi.akustokoko * 100

            """tarkastetaan, että akuston varaus ei laske alle
30%, jos laskee nii aloitetaan alusta"""

            if bussi.akustovaraus < 30:
                if
bussipalautabussilinja().pysakki_list[i].lataus_tila != 0:
                    f_tulos.write('\nLATAUSLASKI LIIAN ALAS
LÄHDETTÄESSÄ PYSÄKILTÄ: ' + str(
bussipalautabussilinja().pysakki_list[i].nimi) + '\n')
                else:
                    if i - 1 >= 0:
                        f_tulos.write('\nLATAUSLASKI LIIAN ALAS
LÄHDETTÄESSÄ PYSÄKILTÄ: ' + str(
bussipalautabussilinja().pysakki_list[i - 1].nimi) + '\n')
                    else:
                        f_tulos.write('\nLATAUSLASKI LIIAN ALAS
LÄHDETTÄESSÄ PYSÄKILTÄ: ' + str(
bussipalautabussilinja().pysakki_list[-1].nimi) + '\n')

            """suoritetaan halutut korjausliikkeet seuraavaa
yritystä varten"""

            bussi.akustokoko = bussi.akustokoko + 5 #
kasvatetaan akuston kokoa 5kWh
            # bussi.kulutus = bussi.kulutus - 0.1 #lisätään

```

```

kulutusta 0.1kW/km

        """
        if
bussi.palautabussilinja().pysakki_lista[i].lataus_tila != 0: #Lisätään
latausaikaa 10sek

bussi.palautabussilinja().pysakki_lista[i].latausaika += 10
        else:
            if i-1 >= 0:
                bussi.palautabussilinja().pysakki_lista[i-
1].latausaika += 10
            else:
                bussi.palautabussilinja().pysakki_lista[-
1].latausaika += 10
        """

        """nollataan muuttujat uuteen yritykseen"""
        i = 0
        ajettumatka = 0
        kokonaiskulutus = 0
        kokonaismatka = 0
        kierros = 0
        ylilataus_pros = 0
        latauskerrat = 0
        bussi.akustovaraus = 90

        break

        """kirjoitetaan arvot ylös tulostiedostoon jokaisen
kilometrin jälkeen"""
        f_tulos.write('\n' + str(round(kokonaismatka, 2)) +
 '/' + str(round(kokonaiskulutus, 2)) + '/' + str(
round(bussi.akustovaraus, 2))) # tallenna
väliaikatiedot tiedostoon

        """jos jäljellä oleva matka alle 1km, niin lisätään
erotus kokonaismääriin"""
        else:
            erotus = matkaajaljella - ajettumatka
            ajettumatka += erotus
            kokonaismatka += erotus
            kokonaiskulutus += erotus * (bussi.kulutusta)
            bussi.akustovaraus = bussi.akustovaraus -
(((bussi.kulutusta * erotus) / bussi.akustokoko) * 100)

            f_tulos.write('\n' + str(round(kokonaismatka, 2)) +
 '/' + str(round(kokonaiskulutus, 2)) + '/' + str(
round(bussi.akustovaraus, 2)))

            if bussi.akustovaraus > 90: # varmenne
                breakpoint()
                f_tulos.write('\njokin meni pieleen\n')
                print('jokin meni pieleen')

        """tarkastetaan onko pysäkki johon saavuttiin
linjaston viimeinen"""
        if i + 1 ==

```

```

(len(bussi.palautabussilinja().pysakki_lista)):
    y = 0
else:
    y = i + 1

    """tarkastetaan onko pysäkki tarkoitus ohittaa
lataamatta"""
    if
bussi.palautabussilinja().pysakki_lista[y].lataus_tila == 0:
        f_tulos.write(
            '\n\nskipppaa lataus pysäkillä: ' +
str(bussi.palautabussilinja().pysakki_lista[y].nimi) + '\n')
        if y == 0:
            i = 0
            matkaajaljella = 0
            ajettumatka = 0
            erotus = 0
            break
        else:
            i += 1
            matkaajaljella = 0
            ajettumatka = 0
            erotus = 0
            break

    """pysäkillä ladataan --> alla laskettu
latausmäärät"""
    else:
        latausteho =
bussi.palautabussilinja().pysakki_lista[y].palautalatausteho()
        minlatausaika = int(

bussi.palautabussilinja().pysakki_lista[y].palautalatausaika()) * 1.1
# arvotaan latausmäärä
        maxlatausaika =
int(bussi.palautabussilinja().pysakki_lista[y].palautalatausaika()) *
0.9

        latausmaarapros = ((random.uniform(minlatausaika,
maxlatausaika)) / 3600 * int(
            latausteho)) / bussi.akustokoko) * 100 #
maksimilataus prosentteina
        latausyksikko = latausmaarapros / 100 # lasketaan
yksikkö jakamalla maksimilataus X

        latauskerrat += 1

    """suoritetaan lataustapahtuma"""

    while bussi.akustovaraus < float(
        90) and latausmaarapros > 0: # ladataan
kunnes 90% varaus tai maksimilataus käytetty
        if bussi.akustovaraus + latausyksikko < 90:
            bussi.akustovaraus += latausyksikko
            latausmaarapros -= latausyksikko
        else:
            latausyksikko -= 90 - bussi.akustovaraus
            bussi.akustovaraus += 90 -

```

```

bussi.akustovaraus

        latausmaarapros -= latausyksikko

        # f_tulos.write('\n' +
str(round(kokonaismatka,2)) + '/' + str(round(kokonaiskulutus,2)) +
 '/' + str(round(bussil.akustovaraus,2)))

        ylilataus_pros += latausmaarapros
        f_tulos.write('\n' + str(round(kokonaismatka, 2)) +
 '/' + str(round(kokonaiskulutus, 2)) + '/' + str(
        round(bussil.akustovaraus, 2)))

        latausmaarapros = 0
        matkaajaljella = 0
        ajettumatka = 0
        erotus = 0

        if i < (len(bussi.palautabussilinja().pysakki_lista))
- 1: # tarkistetaan aloitetaanko kierros alusta
        i += 1
    else:
        i = 0
        kierros += 1

    """kirjoitetaan tiedostoon muuttujien arvot lopussa"""
    f_tulos.write('\n\nMuuttujat lopussa: \n' + bussi.tulosta())

    lop_lat_ajat = [] # lopulliset latausajat

    for a in range(poten_latauspaikat):
        if bussi.palautabussilinja().pysakki_lista[a].lataus_tila ==
1: #vain pysakit, joissa ladataan

    lop_lat_ajat.append(bussi.palautabussilinja().pysakki_lista[a].latausa
ika)

        f_tulos.write("\n" + 'Pysäkin ID: ' + str(a) + '\n')
        f_tulos.write('Latausaika lopussa: ' + str(
            bussi.palautabussilinja().pysakki_lista[a].latausaika) +
'\n' + 'pysäkillä: ' + str(
            bussi.palautabussilinja().pysakki_lista[a].nimi) +
'\n')

        lop_lat_ajat_keskiarvo = round(statistics.mean(lop_lat_ajat), 2)
# muuttuun tallennetaan latauksen keskiarvo

    """palautetaan akustokoko ja kulutus python konsolin listauksia
varten"""
    return bussi.akustokoko, round(bussi.kulutus, 2),
round((ylilataus_pros / latauskerrat), 2), lop_lat_ajat_keskiarvo

def luemuistiin(str1, str2, str3):
    """Lukee muistiin linjojen, pysäkkien ja bussien tiedot ja
palauttaa luokkaoliot"""
    file_object = open(str1, "r") # luetaan muistiin linjan tiedot
    linja_nimi = (file_object.readline().rstrip('\n'))
    linja_pituus = (file_object.readline().rstrip('\n'))
    file_object.close()

```



```

    linja = Linja(linja_nimi, linja_pituus, pysakki_lista=[]) #
    luodaan linjaolio

    rivi = 0

    with open(str2, "r") as file_object: # tarkistetaan tiedostossa
    olevien pysäkkien määrä
        for line in file_object:
            rivi += 1

    pysakkeja = int(rivi / 5)

    with open(str2, "r") as file_object: # luetaan pysakit muistiin

        for i in range(pysakkeja):
            pysakki_nimi = (file_object.readline().rstrip('\n'))
            etaisyyys = int(file_object.readline().rstrip('\n'))
            latausaika = int(file_object.readline().rstrip('\n'))
            latausteho = int(file_object.readline().rstrip('\n'))
            lataus_tila = int(file_object.readline().rstrip('\n'))
            linja.pysakki_lista.append(
                Pysakki(pysakki_nimi, etaisyyys, latausaika,
                    latausteho, lataus_tila)) # luodaan pysakkioliot

    file_object.close()

    file_object = open(str3, "r") # luetaan bussin tiedot muistiin
    bussin_nimi = linja_nimi
    bussin_akusto = int(file_object.readline().rstrip('\n'))
    bussin_kulutus = float(file_object.readline().rstrip('\n'))
    bussin_akustovaraus = int(file_object.readline().rstrip('\n'))
    file_object.close()

    bussi = Bussi(bussin_nimi, bussin_akusto, bussin_kulutus,
        bussin_akustovaraus, linja) # luodaan bussiolio

    return linja, bussi # palautetaan linja ja bussi oliot

def aseta_bakustokoko(int):
    """Ylikirjoittaa tekstitiedostossa olevan akustokoon uudella"""
    with open(bussintiedot, "r") as file_object:
        temp = file_object.read().splitlines()

    temp[0] = int

    with open(bussintiedot, "w") as file_object:
        for i in range(len(temp)):
            file_object.write(str(temp[i])+'\n')

def aseta_bkulutus(int):
    """Ylikirjoittaa tekstitiedostossa olevan kulutuslukeman
    uudella"""
    with open(bussintiedot, "r") as file_object:
        temp = file_object.read().splitlines()

```

```

temp[1] = int

with open(bussintiedot, "w") as file_object:
    for i in range(len(temp)):
        file_object.write(str(temp[i])+'\n')

def aseta_bakustonvarausalussa(int):
    """Ylikirjoittaa tekstitiedostossa olevan alun varauslukeman
    uudella"""
    with open(bussintiedot, "r") as file_object:
        temp = file_object.read().splitlines()

    temp[2] = int

    with open(bussintiedot, "w") as file_object:
        for i in range(len(temp)):
            file_object.write(str(temp[i])+'\n')

def aseta_platausaika(int):
    """Ylikirjoittaa tekstitiedostoissa olevat latausajat uusilla
    (kaikkien pysäkkien osalta)"""
    for i in range(len(tiedostonimipysakki)):

        file_object = open(tiedostonimipysakki[i], "r")
        temp = file_object.read().splitlines()
        file_object.close()

        temp[2] = int
        a = 2

        while a + 5 <= len(temp):
            a += 5
            temp[a] = int

        with open(tiedostonimipysakki[i], "w") as file_object:
            for y in range(len(temp)):
                file_object.write(str(temp[y])+'\n')

def aseta_platausteho(int):
    """Ylikirjoittaa tekstitiedostoissa olevat lataustehot uusilla
    (kaikkien pysäkkien osalta)"""
    for i in range(len(tiedostonimipysakki)):

        file_object = open(tiedostonimipysakki[i], "r")
        temp = file_object.read().splitlines()
        file_object.close()

        temp[3] = int
        a = 3

        while a + 5 <= len(temp):
            a += 5
            temp[a] = int

```

```

        with open(tiedostonimipysakki[i], "w") as file_object:
            for y in range(len(temp)):
                file_object.write(str(temp[y])+'\n')

"""Määritetään käytettävät tiedostot"""
tiedostonimilinja = ['Linja 1.txt', 'Linja 2.txt', 'Linja 3.txt',
                    'Linja 12.txt', 'Linja S1.txt'] # ladattavat linjat
tiedostonimipysakki = ['Linja 1 pysakit.txt', 'Linja 2 pysakit.txt',
                      'Linja 3 pysakit.txt', 'Linja 12 pysakit.txt',
                      'Linja S1 pysakit.txt'] # ladattavat pysakit
bussintiedot = 'Bussin tiedot.txt' # ladattavat bussi tiedot

"""Esimerkkejä ylikirjoitus funktioiden käytöstä"""
aseta_bakustokoko(30)
aseta_bkulutus(1.5)
aseta_bakustonvarausalussa(90)
aseta_platausaika(100)
aseta_platausteho(600)

"""Alustetaan listat muuttujille"""
linja_1_list = []
linja_2_list = []
linja_3_list = []
linja_12_list = []
linja_S1_list = []

"""käydään läpi kaikki linjat x kertaa ja kirjoitetaan tulokset .txt
ja tulostetaan osa tuloksista lisäksi listoina"""
for i in range(5):
    for x in range(len(tiedostonimilinja)):
        if x == 0:
            linja_1_list.append(aja_bussia(x, 300))
        if x == 1:
            linja_2_list.append(aja_bussia(x, 300))
        if x == 2:
            linja_3_list.append(aja_bussia(x, 300))
        if x == 3:
            linja_12_list.append(aja_bussia(x, 300))
        if x == 4:
            linja_S1_list.append(aja_bussia(x, 300))

"""Tulostetaan listat"""
print('linja 1', linja_1_list)
print('linja 2', linja_2_list)
print('linja3', linja_3_list)
print('linja 12', linja_12_list)
print('linja S1', linja_S1_list)

```